

Ermittlung des Hektolitergewichts durch Bestimmung des luftgefüllten Porenvolumens in Getreideschüttungen

Janine Berberich, Markus Huth, Andrea Feiffer, Henning Kuper

Die Bestimmung des Hektolitergewichts ist eine weitverbreitete Messmethode, um schnell Informationen über die Qualitätseigenschaften von Getreide zu erhalten. Es gibt jedoch keine weltweit einheitliche Vorgehensweise bei der Bestimmung; dies führt – je nach Messmethode – zu unterschiedlichen Ergebnissen. Des Weiteren wird das Messergebnis mit den aktuell gängigen Methoden auch von Umgebungsbedingungen wie z.B. Vibrationen, Entmischungsvorgängen oder Güteeigenschaften wie der Korngeometrie beeinflusst. Nicht zuletzt beeinflusst auch der Faktor Mensch das Messergebnis. Aufgrund von Vibrationen oder Luftströmen auf dem Mähdrescher ist es zurzeit nur schwer möglich, das Hektolitergewicht online während der Ernte zu bestimmen. Das hierfür notwendige Wiegen der einzelnen Getreideproben erfordert konstante, definierte und vor allem vibrationsfreie Umgebungsbedingungen. Gemeinsam mit der BlueMethano GmbH wurde an der Humboldt-Universität zu Berlin deshalb ein neuartiges System zur Bestimmung des Hektolitergewichts entwickelt. Das Gewicht wird in diesem Verfahren über das luftgefüllte Porenvolumen einer Getreideprobe bestimmt. Hierfür ist keine Waage notwendig, sodass das System auch online auf der Erntemaschine eingesetzt werden kann.

Schlüsselwörter

Hektolitergewicht, Porenvolumen, Getreidequalität, Kornschüttung, Mähdrescher

Das Hektolitergewicht ist bereits seit langem eine gängige Messgröße für die schnelle Qualitätsbeurteilung von Getreide. In der Vergangenheit wurde das Hektolitergewicht als Maß für die Mehlausbeute aus den einzelnen Körnern herangezogen (LOCKWOOD 1960). Heute wird es sowohl von den Produzenten als auch vom Getreidehandel bestimmt; als schnell zu ermittelnder Indikator zur Getreidequalität spielt es unter anderem bei der Preisfestsetzung eine Rolle (LEE et al. 2000).

Die Bestimmungsmethoden für das Hektolitergewicht unterscheiden sich weltweit teilweise stark. Aufgrund der unterschiedlichen Messanordnungen kommt es daher zu Abweichungen der Hektolitergewichte gleicher Proben. Gemeinsam ist allen Methoden, dass ein Wiegen der Proben notwendig ist. In Deutschland wird standardmäßig ein Chondrometer für die Bestimmung des Hektolitergewichts genutzt. Dieses fasst 0,5 l. Mittels Korrekturtabellen wird das damit ermittelte Gewicht anschließend auf 100 l skaliert. Eine direkte Bestimmung während der Ernte auf dem Mähdrescher ist allerdings schwierig, da die Vibrationen und Luftströme auf dem Mähdrescher den Beschleunigungsprozess der Waage beeinflussen können.

Grundsätzlich ist die Getreidequalität auch optisch bewertbar. Mithilfe von Kameraaufnahmen können sowohl die Kornformen als auch optische Auffälligkeiten analysiert werden (BERBERICH et al. 2012). Diese Analysemethode liefert zwar gute Ergebnisse, benötigt für die schnelle Online-Bewertung aber leistungsstarke Rechentechnik und ist zudem bisher noch teuer. Außerdem ist mit der optischen Analyse stets nur die Oberfläche des Getreides bewertbar. Die innere Beschaffenheit der Probe lässt sich damit nicht abbilden.

Mit der Bestimmung des luftgefüllten Porenvolumens einer Kornschüttung kann nicht direkt auf das Hektolitergewicht geschlossen werden. Stattdessen soll damit eine Aussage über die Hohlräume innerhalb der Kornschüttungen getroffen werden. Analog wird diese Messmethode bisher z. B. in der Bodenkunde angewendet (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010). Diese Hohlräume lassen Rückschlüsse auf die innere Zusammensetzung der Getreideschüttung zu. Damit soll auf Fremdbesatz, Bruch- oder Schrumpfkörner geschlossen werden.

Material und Methoden

Für die Evaluierung des Zusammenhangs zwischen Hektolitergewicht und luftgefülltem Porenvolumen wurden Getreideproben aus unterschiedlichen Regionen Deutschlands untersucht. Die Proben umfassten Winterweizen, Wintergerste, Durum und Hafer. Das Getreide wurde im Jahr 2016 von Landwirten und Getreidehändlern aus Baden-Württemberg, Bayern und Thüringen sowie der Landesanstalt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung in Brandenburg zur Verfügung gestellt. Bis zur jeweiligen Analyse wurden die Proben kühl, dunkel, trocken und luftdicht gelagert, sodass physiologische Veränderungen während der Lagerung ausgeschlossen werden konnten. Um möglichst realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, wurden die Proben zunächst nicht gesiebt und auch keiner sonstigen Aufbereitung unterzogen.

Für die einzelnen Versuche wurde das Chondrometer „Hecto“ (Pfeuffer GmbH) genutzt. Als Waage zur Bestimmung des Gewichts des Chondrometer-Inhalts diente die Feinwaage PCB 3500-2 (Kern & Sohn). Die anschließende Bestimmung des luftgefüllten Porenvolumens wurde mit einem speziell für die Versuche angefertigten Luftpyknometer (Firma BlueMethano) durchgeführt. Außerdem wurde ein für die Versuche gefertigtes 100-l-Gefäß zur Ermittlung des tatsächlichen Hektolitergewichts eingesetzt. Die Gewichtsbestimmung erfolgte hierbei mit der Plattformwaage IFB-100K-3 (Kern & Sohn).

Versuchsaufbau und -durchführung

Zum Referenzieren des Chondrometers wurde zunächst ein Vorversuch durchgeführt. Hierbei wurde ein Behälter mit 100 l Fassungsvermögen mit unterschiedlichen Getreidearten und -sorten befüllt. Das Getreide wurde am oberen Rand glatt abgestrichen und anschließend gewogen. Um zu untersuchen, inwieweit sich Vibrationen in der Umgebung auf das Messergebnis auswirken, wurden die Proben nach dem ersten Wiegen auf ein Vibrationspodest gestellt und für jeweils 30 Sekunden einer definierten Vibration ausgesetzt. Währenddessen verdichtete sich die Getreideschüttung. Der durch das Einrütteln frei gewordene Platz im 100-l-Gefäß wurde im Anschluss mit der gleichen Getreidesorte aufgefüllt und die Probe wurde erneut gewogen. Damit sollte der Einfluss des Einfüllens bei der Bestimmung des Hektolitergewichts ermittelt werden. Nach Abschluss des Verfahrens wurde von jeder 100-l-Probe eine 1-l-Rückstellprobe entnommen. Hierfür wurde der Inhalt des 100-l-Gefäßes aufgeschüttet. Anschließend wurde ein Behälter mit einem Fassungsvermögen von 1 l in die Schüttung eingeführt und eine Zufallsprobe entnommen. Von dieser Teilprobe wurde anschließend das Hekto-

litergewicht mittels Chondrometer und dazugehöriger Tabellen bestimmt und die Ergebnisse wurden mit jenen der Vor-Ort-Versuche verglichen (Abbildung 1).



Abbildung 1: 100-l-Gefäß mit Vibrationspodest und Waage zur Bestimmung des Gewichts von 100 l Getreide (© J. Berberich)

Für die weiteren Versuche wurden das Chondrometer, die Laborwaage und das Luftpyknometer genutzt. Das Chondrometer wurde zuvor dahingehend überarbeitet, dass der obere und der untere Zylinder voneinander getrennt werden konnten. Vorversuche hatten gezeigt, dass dies keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Allerdings war die Trennung für die weitere Verarbeitung der Proben notwendig. Zunächst wurde das Chondrometer nach Anleitung befüllt und die Analyse soweit durchgeführt, bis die Getreideprobe durch das Abschneidemesser in die Teile im oberen und im unteren Zylinder getrennt war. Der Probenteil, welcher sich im oberen Zylinder befand, wurde entfernt. Anschließend wurde das Abschneidemesser herausgezogen und die beiden Zylinder voneinander getrennt. Nun wurde der untere Zylinder mit dem darin befindlichen Getreide in die Messkammer des Luftpyknometers gestellt (Abbildung 2 a). Die Kammer wurde luftdicht verschlossen und die Messung des luftgefüllten Porenvolumens gestartet (Abbildung 2 b). Das Luftpyknometer besteht aus einer Referenzkammer und der Messkammer. In der Referenzkammer wurde während der Messung zunächst ein Überdruck von 1 bar erzeugt. Beide Kammern wurden anschließend miteinander verbunden, so dass ein Luftaustausch stattfinden konnte. Die eigentliche Messung des luftgefüllten Porenvolumens erfolgte nachdem sich ein Druckgleichgewicht zwischen Referenzkammer und Messkammer eingestellt hatte. Zur Speicherung und Auswertung der gemessenen Daten war das Luftpyknometer über eine RS-232-Schnittstelle mit einem Computer verbunden. Nach der Messung wurde der untere Teil des Chondrometers wieder aus dem Luftpyknometer entnommen und das darin befindliche Getreide gewogen. Dies war der wichtigste Schritt für die Bestimmung des Hektolitergewichts. Ausgehend von diesem Gewicht wurde das Hektolitergewicht der jeweiligen Probe mithilfe der dem Chondrometer beiliegenden Tabelle bestimmt.

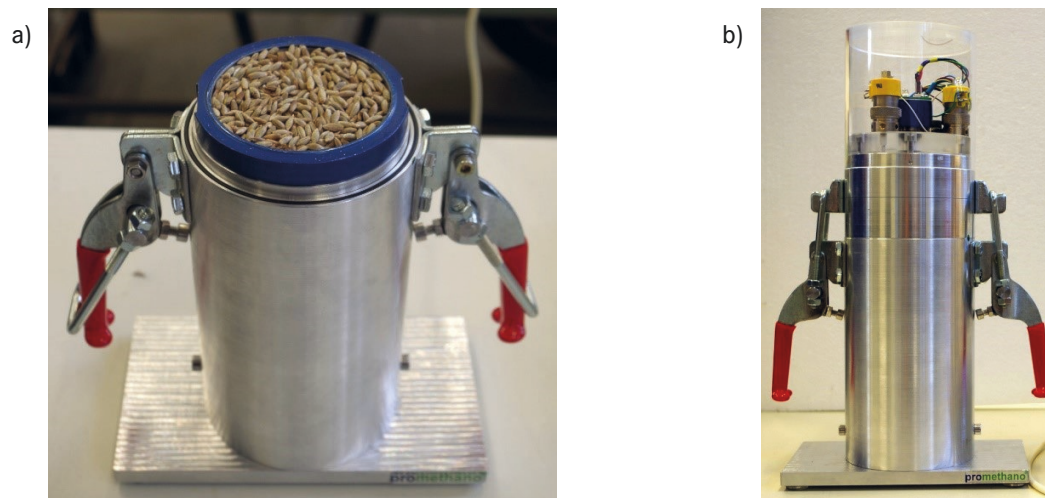


Abbildung 2: a) Unterer Zylinder des Chondrometers in der Messkammer des Luftpyknometers, b) Luftdicht verschlossenes Luftpyknometer mit Getreideproben im Inneren (© J. Berberich)

Mithilfe der Werte des Luftpyknometers wurde anschließend das Kornvolumen innerhalb der Messkammer berechnet. Dieses diente als Grundlage für die Ermittlung der inneren Dichte bzw. Rohdichte der Körner einzelner Getreidearten. Bei unterschiedlichen Dichten einzelner Arten wäre eine Bestimmung des Hektolitergewichts über das luftgefüllte Porenvolumen grundsätzlich nicht möglich. Für die Überprüfung der Korndichten wurden Weizen-, Roggen- und Gerstenproben analysiert. Die Feuchte des Getreides lag zwischen 12 und 15 %.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Dichteanalyse einzelner Getreidearten waren ausschlaggebend für alle weiteren Untersuchungen. Abbildung 3 zeigt, dass sich die einzelnen Weizenproben mit Ausnahme von Probennummer zwei in ihrer Dichte ähnlich sind. Die mittlere Dichte von Weizen beträgt $1,4 \text{ g/cm}^3$.

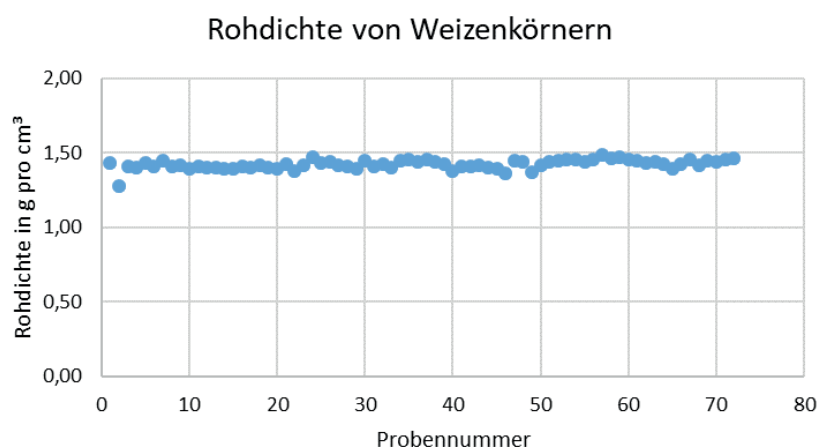


Abbildung 3: Rohdichte von Weizenkörnern

Die mittlere Dichte von Roggen beträgt ebenfalls $1,4 \text{ g/cm}^3$. Aus Abbildung 4 geht außerdem hervor, dass sich die einzelnen Roggenproben in ihrer Dichte nur geringfügig unterscheiden.

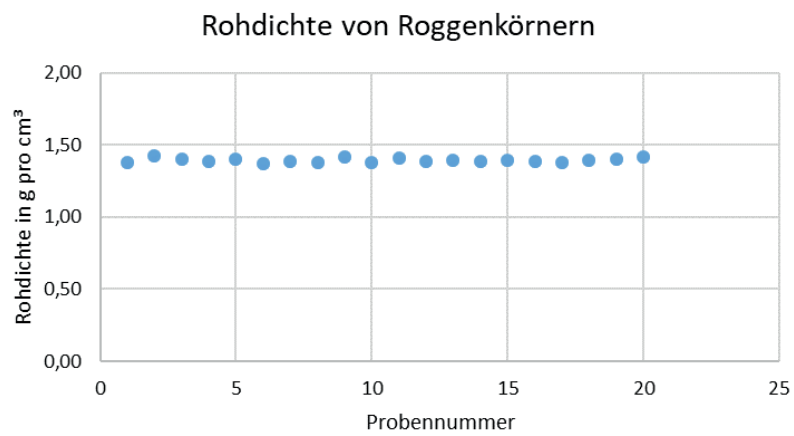


Abbildung 4: Rohdichte von Roggenkörnern

In Abbildung 5 ist die Rohdichte der einzelnen Gerstenproben dargestellt. Es zeigt sich, dass es nur leichte Schwankungen zwischen den Proben gibt. Die mittlere Korndichte von Gerste liegt bei 1,4 g/cm³.

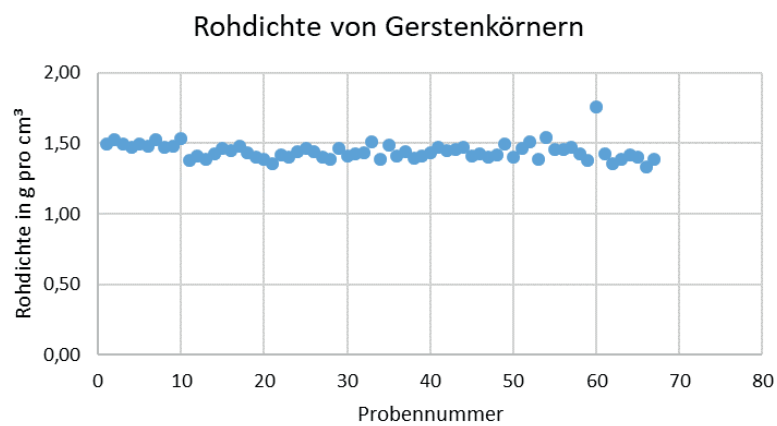


Abbildung 5: Rohdichte von Gerstenkörnern

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung des Hektolitergewichts mit der momentan gängigen Chondrometer-Methode im Vergleich zur Bestimmung mittels 100-l-Gefäß.

Tabelle 1: Vergleich der Hektolitergewichte, welche mittels Chondrometer und 100-l-Gefäß bestimmt wurden

Getreideart	Sorte	Hektolitergewicht Chondrometer	Hektolitergewicht 100-l-Behälter	Hektolitergewicht 100-l-Gefäß nach Rütteln und Auffüllen
		in kg/hl	in kg/hl	in kg/hl
Winterweizen	Bussard	81	81	83
Winterweizen	Bussard	81	81	83
Winterweizen	Akteur	82	81	84
Winterweizen	Akteur	82	82	84
Winterweizen	Bernstein	80	80	82
Winterweizen	Bernstein	80	81	82
Winterweizen	Toras	79	79	81
Winterweizen	Toras	79	79	81
Winterweizen	Alfons	77	77	79
Winterweizen	Alfons	76	77	79
Durum	Durasol	79	79	81
Durum	Durasol	80	81	82
Hafer	Mischung	50	50	52
Hafer	Mischung	51	50	52
Wintergerste	Souleyka	64	64	66
Wintergerste	Souleyka	63	64	65

Tabelle 1 und Abbildung 6 zeigen deutlich, dass die Umrechnung der mit dem Chondrometer bestimmten Gewichte mittels vom Hersteller beigelegter Tabellen das tatsächliche Gewicht von 100 l der jeweiligen Probe widerspiegelt. Über alle Proben ergibt sich eine mittlere Abweichung von 0,5 kg/hl. Es zeigt sich außerdem, dass das Hektolitergewicht durch Einrütteln mit anschließendem Auffüllen des 100-l-Gefäßes im Mittel um 2,14 kg erhöht werden konnte.

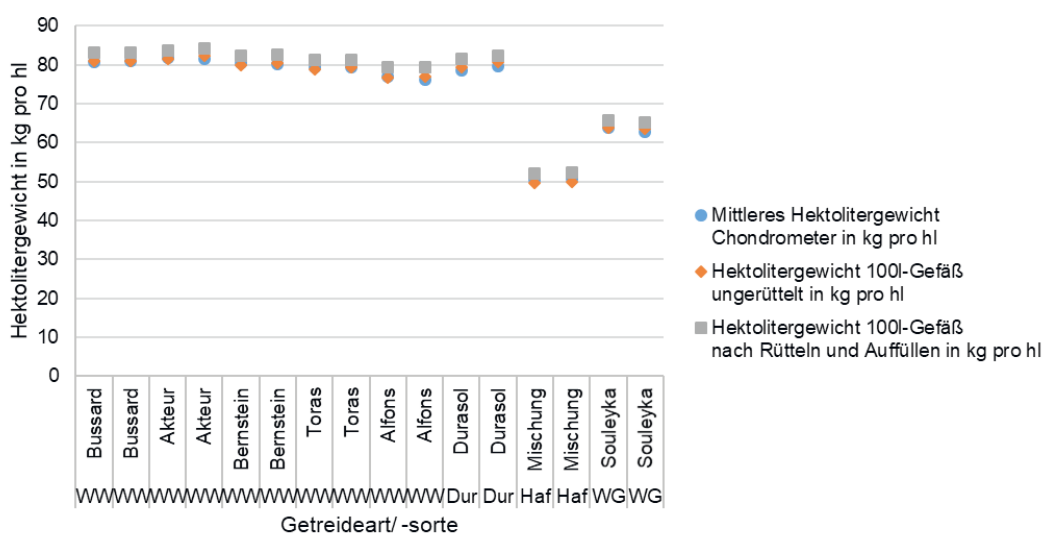


Abbildung 6: Vergleich von tatsächlichem Gewicht von 100 l Getreide und dem mit Chondrometer und Tabellen ermittelten Hektolitergewicht

Die Ergebnisse ausgewählter Proben aus den Versuchen zum Zusammenhang zwischen Hektolitergewicht und luftgefülltem Porenvolumen zeigt Abbildung 7. Es wird deutlich, dass zwischen beiden Parametern eine indirekte Korrelation besteht. Diese wird durch einen Korrelationskoeffizienten von $-0,99$ bestätigt. Hohe Porenvolumina weisen damit auf niedrige Hektolitergewichte hin und umgekehrt.

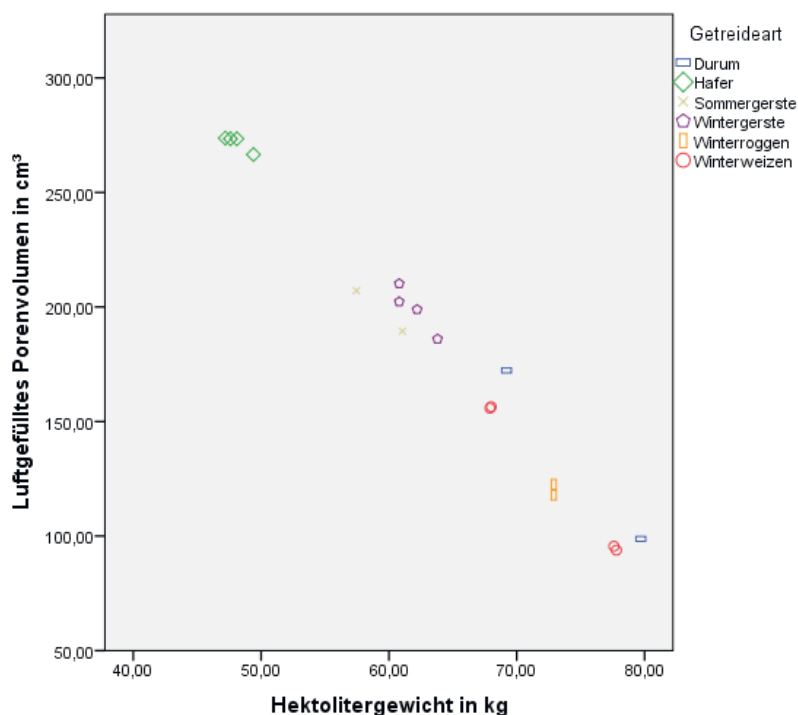


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Hektolitergewicht und luftgefülltem Porenvolumen

Diskussion

Aus den Werten in Abbildung 3, 4 und 5 geht hervor, dass die Rohdichte der wichtigsten Getreidearten Weizen, Roggen und Gerste unter lagerstabilen Feuchtegehalten mit $1,4 \text{ g/cm}^3$ gleich ist. Dies bestätigt die Aussage von CHANG (1988), welcher bereits Versuche zur Bestimmung der Rohdichte von Getreidekörnern mit einem Luftpyknometer durchgeführt hat. Damit ist die Voraussetzung für die weiteren Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Hektolitergewicht und luftgefülltem Porenvolumen bei Getreide gegeben.

Zur Analyse der Korrelation zwischen luftgefülltem Porenvolumen und Hektolitergewicht ist eine Referenzmethode notwendig. Die Versuche zum Zusammenhang zwischen Chondrometer und tatsächlichem 100-l-Gewicht von Getreide zeigen, dass das Chondrometer als Referenzmethode geeignet ist. Die geringen Gewichtsunterschiede der beiden Bestimmungsmethoden können auf das Einfüllen des Getreides in das jeweilige Untersuchungsgefäß zurückgeführt werden. Beim Chondrometer erfolgt das gleichmäßige Einfüllen des Getreides mittels eines Fallgewichts, welches die Luft im unteren Teil des Messzylinders verdrängt. Für die Versuche mit dem 100-l-Gefäß wurde das Getreide schrittweise mit einer Schaufel eingefüllt. Dies kann zu einer heterogeneren Kornschüttung führen. Außerdem handelte es sich bei der Probe im Chondrometer jeweils um eine Stichprobe aus der 100-l-Probe, sodass auch

ein Probenteilungsfehler nicht ausgeschlossen werden konnte. Die Verdichtung der Getreideschüttung mittels Vibrationsantrieb bestätigte ebenso, dass die Umgebungsbedingungen das Messergebnis beeinflussen. Die zeigte sich bereits in vorangegangenen Versuchen, in welchen untersucht wurde, wie sich Vibration auf die Ergebnisse mit dem Chondrometer auswirken (BERBERICH 2014)

Eine indirekte Proportionalität zwischen Hektolitergewicht und luftgefülltem Porenvolumen zeigt Abbildung 7. Dieser Zusammenhang beider Messgrößen ermöglicht es, das Hektolitergewicht indirekt und ohne Waage zu bestimmen. Messunsicherheiten, welche sich normalerweise durch das Wiegen ergeben, können somit minimiert werden. Die Bestimmung des Hektolitergewichts auf dem Mähdrescher mit herkömmlichen Methoden ist aufgrund der vorherrschenden Randbedingungen schwierig. Über das luftgefüllte Porenvolumen kann die Online-Ermittlung des Hektolitergewichts während der Ernte realisiert werden. Der Landwirt erhält somit stets aktuelle Informationen über die Guteigenschaften seines Getreides. Zusätzlich kann die Ertragsmessung optimiert werden, wenn es möglich ist, den Massenstrom während der Fahrt zu bestimmen.

Auch die unterschiedlichen geometrischen Stoffparameter einzelner Getreidearten führen dazu, dass sich die Körner im Messgefäß unterschiedlich anordnen. Eine perfekte Kugelpackung führte zu einem luftgefüllten Porenvolumen von 26 % (KITTEL 2013). Abbildung 7 zeigt, dass der prozentuale Luftanteil im 0,5-l-Messzylinder des Luftpyknometers stets höher ist, da es sich bei den Getreidekörnern geometrisch nicht um Kugeln handelt. In Abbildung 7 wird außerdem ersichtlich, dass Hafer das höchste luftgefüllte Porenvolumen aufweist. Dies ist auf die Kornform zurückzuführen, welche von allen untersuchten Getreidearten am wenigsten einer Kugel ähnelt (DONEV et al. 2004). Die dadurch entstehenden Zwischenräume spiegeln sich im gemessenen Porenvolumen wider. Eine zeitbezogene Analyse der Druckverlaufskurven könnte zusätzlich Aufschluss darüber geben, wie die Porengrößenverteilung in der Schüttung ist. Bei kleineren Poren wäre die Druckabfallskurve weniger steil als bei großen. Damit wäre eine Aussage über Besatz oder Ähren in der Getreideschüttung möglich und die Druscheinstellungen könnten optimiert werden.

Schlussfolgerungen

Basierend auf bisherigen Erkenntnissen können über das Hektolitergewicht Rückschlüsse auf die Getreidequalität, die Probenzusammensetzung und auf die Druschqualität gezogen werden. Bisher ist die Bestimmung des Hektolitergewichts während der Fahrt auf dem Mähdrescher nicht zufriedenstellend gelöst. Die Versuche mit einem Luftpyknometer im Labor zeigen erfolgsversprechende Ergebnisse bezüglich der indirekten Ermittlung des Hektolitergewichts über das Porenvolumen einer Getreideschüttung auf einer Erntemaschine.

Weitere Versuche sollen zeigen, inwieweit sich eine kontrollierte Vibration während des Einfüllens in die Messapparatur positiv auf robuste Messergebnisse auswirkt. Es soll außerdem der Temperatureinfluss auf das Messergebnis untersucht werden. In Laborversuchen zeigte sich, dass Temperaturunterschiede zwischen dem gelagerten Korn und der erzeugten Druckluft zu signifikanten Messunterschieden führen können. Die Feldversuche sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit diese Abweichungen durch die Nutzung der Umgebungsluft des Getreides auf dem Feld für die Druckluftherzeugung minimiert werden können.

Zukünftig kann das neue System dazu beitragen, dass sowohl Praktiker als auch der Getreidehandel in der Lage sind, schnell eine Aussage über die Getreidequalität zu treffen. Das Messsystem soll sowohl stationär als auch direkt auf dem Mähdrescher einsetzbar sein und robustere Ergebnisse liefern können, als es bisher mit der Waage möglich ist. Beim Einsatz auf der Erntemaschine könnte durch die Analyse der Probenzusammensetzung außerdem die Druschqualität verbessert werden.

Literatur

- Berberich, J. (2014): Untersuchungen zum Zusammenhang von Hektolitergewicht, luftgefülltem Porenvolumen und Kornformen bei Getreide. Masterarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin
- Berberich, J.; Risius, H.; Huth, M.; Hahn, J. (2012): Investigation of continuous imaging analysis of grain quality on a combine harvester. In: Soil and Water Engineering. International Conference of Agricultural Engineering - CIGR-AgEng 2012: agriculture and engineering for a healthier life, Valencia, Spain, 8-12 July 2012, CIGR-EurAgEng
- Chang, C.S. (1988): Measuring Density and Porosity of Grain Kernels Using a Gas Pycnometer. *Cereal Chemistry* 65(1), pp. 13–15
- Donev, A.; Cisse, I.; Sachs, D.; Variano, E.A.; Stillinger, F.H.; Connelly, R.; Torquato, S.; Chaikin, P.M. (2004): Improving the Density of Jammed Disordered Packings Using Ellipsoids. *Science* 303(5660), pp. 990–993, <https://doi.org/10.1126/science.1093010>
- Kittel, C. (2013): Einführung in die Festkörperphysik/Symmetriemodelle der 32 Kristallklassen zum Selbstbau: Einführung in die Festkörperphysik. München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag
- Lee, M.; Lerohl, M.; Unterschultz, J. (2000): Buyer preferences for durum wheat: a stated preference approach. *The International Food and Agribusiness Management Review* 3(3), pp. 353–366, [https://doi.org/10.1016/S1096-7508\(01\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S1096-7508(01)00053-2)
- Lockwood, J.F. (1960): Flour Milling. Stockport, Henry Simon Ltd.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag

Autoren

Janine Berberich, M. Sc., ist wissenschaftliche Mitarbeiterin und **Henning Kuper** war studentischer Mitarbeiter an der Lebenswissenschaftlichen Fakultät, Albrecht Daniel Thaer-Institut für Agrar- und Gartenbauwissenschaften, Fachgebiet Biosystemtechnik an der Humboldt-Universität zu Berlin, Albrecht-Thaer-Weg 1, 14195 Berlin, E-Mail: janine.berberich@agrar.hu-berlin.de

Markus Huth, M. Sc., Geschäftsführer, BlueMethano GmbH, Chausseestr. 56, 10115 Berlin

Dr. Andrea Feiffer, Gesellschafterin, feiffer-consult, Talstraße 12, 99706 Sondershausen

Hinweise und Danksagungen

Die Förderung des Vorhabens erfolgt aus Mitteln der Landwirtschaftlichen Rentenbank.

Wir danken allen beteiligten Praxisbetrieben, Getreidehändlern und dem Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung in Teltow-Ruhlsdorf für die Bereitstellung der Getreideproben. Außerdem gilt unser Dank Herrn Dr. Rainer Tölle für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.