

# Prinziplösungen für die Dichtemessung in Siliergütern

Die Siliergutdichte beeinflusst die Silagequalität in bedeutendem Maß. Für die Entwicklung eines Online-Messverfahrens wurden verschiedene physikalische Prinziplösungen analysiert. Im Ergebnis dessen wurden das Georadar und die Mikrowellenmesstechnik experimentell untersucht.

Von den verfahrenstechnischen Parametern hat die Siliergutdichte einen großen Einfluss auf die Silagequalität. Physikalisch sinnvoll ist die Angabe der erforderlichen Oberflächendichten der Originalsubstanz (Frischmasse). Als Kriterium für die Höhe der Einlagerungsdichte der Originalsubstanz gilt, dass der Gasaustausch nicht größer sein darf als die Gasbildung im Siliergut. Dies bedeutet, dass für angewelltes Siliergut bei freier Siliergutoberfläche ohne Zudeckung eine Dichte > 750 kg OS/m<sup>3</sup> vorhanden sein müsste. Bei ganzflächig beschwerter Folie ist nur noch eine Einlagerungsdichte von 400 bis 500 kg OS/m<sup>3</sup> nötig (Rettig 1972, zitiert in [2]).

Durchgeführte Dichtemessungen an Praxisilos ergaben allerdings, dass die empfohlenen Dichtewerte in mehr als der Hälfte der Bestimmungen nicht erreicht wurden (Thay-

sen 2006, zitiert in [2]). Hauptursache ist der ungenügende Verdichtungsaufwand beim Einlagern. Zum Erreichen der geforderten Mindestdichten muss sorgfältig mit Traktoren oder anderen geeigneten Fahrzeugen verdichtet werden [2, 3]. Der Verdichtungszeitbedarf hängt ab von der Verfahrenstechnik des Verdichtens und im Wesentlichen vom Trockenmassegehalt. Von Nachteil ist, dass es für den praktischen Landwirt keine zuverlässigen Dichtemessgeräte gibt, die vor allem beim Einlagern online arbeiten.

## Prinziplösungen für die Dichtemessung

Es wurde eine Reihe von Prinziplösungen analysiert und auf ihre Eignung für die Online-Messung der Silagedichte bewertet (Tab. 1). Ihre physikalische Wirkungsweise kann hier nicht im Detail beschrieben werden.

Tab. 1: Zusammenstellung und Bewertung möglicher Messverfahren für die Online-Messung der Dichte von Siliergütern

Table 1: Compiling and assessing possible measuring methods for online density measurement of silage material

|    |                                       | berührungslos | während der Fahrt | von der Oberfläche | Messgutbeeinflussung | Eindringtiefe [m] | Baufwand   | Sicherheitsaufwand | Wichtung |
|----|---------------------------------------|---------------|-------------------|--------------------|----------------------|-------------------|------------|--------------------|----------|
| 1  | Geo-Radar                             | ja            | ja                | ja                 | nein                 | bis 5             | komp.      | klein              | XXX      |
| 2  | Mikrowellenstreuungsfeldsonde         | nein          | ja                | ja                 | nein                 | bis 0,3           | aufw.      | mittel             | XX       |
| 3  | Hochfrequenzfeuchtsensor              | nein          | ja                | ja                 | nein                 | bis 0,03          | aufw.      | mittel             | X        |
| 4  | Messrad (Einsinktiefe)                | nein          | ja                | ja                 | ja                   | exp.              | aufw.      | klein              | X        |
| 5  | Ultraschalldickensensor               | nein          | ja                | ja                 | nein                 | exp.              | sehr aufw. | mittel             | (X)      |
| 6  | Foliendruck/KraftMesssystem           | nein          | ja                | ja                 | nein                 | exp.              | aufw.      | klein              | (X)      |
| 7  | Isotopensonde Cs 137                  | nein          | ja                | ja                 | ja                   | bis 0,8           | komp.      | mittel             | (X)      |
| 8  | Messung der Einsinktiefe des Traktors | ja            | ja                | ja                 | nei                  | exp.              | komp.      | klein              | (X)      |
| 9  | Penetrometer                          | nein          | nein              | nein               | ja                   | bis 5             | sehr aufw. | hoch               | (X)      |
| 10 | Nah-Infrarot-Spektroskopie            | ja            | ja                | ja                 | nein                 | bis 0,01          | kompakt    | klein              | 0        |
| 11 | Strömungsmessung                      | nein          | nein              | ja                 | ja                   | exp.              | sehr aufw. | mittel             | 0        |
| 12 | Gleichstromelektrik                   | nein          | nein              | ja                 | nein                 | exp.              | aufw.      | hoch               | 0        |
| 13 | Ultraschallabstandssensor             | ja            | ja                | ja                 | nein                 | nein              | komp.      | klein              | 0        |
| 14 | Laservermessung 3-D                   | ja            | ja                | ja                 | nein                 | nein              | von        | mittel             | 0        |

exp. = experimentell zu ermitteln  
 komp. = kompakte Bauweise im Rahmen des Lastenheftes  
 aufw. = aufwendige Bauweise  
 XXX = Vorzugslösung  
 XX - untersuchungswürdig  
 X - verwendbar  
 (X) - bedingt verwendbar  
 0 - keine Anwendung

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Füll leitet die Abteilung „Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung“ am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim. Dr.-Ing. Hartmut Schemel arbeitet als Wissenschaftler in dieser Abteilung. Dietmar Köppen bearbeitete als Student der Universität Rostock eine Diplomarbeit am ATB Potsdam-Bornim, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam; e-mail: cfuerll@atb-potsdam.de

## Schlüsselwörter

Silage, Verdichten, Dichte, Dichtemessung

## Keywords

Silage, compaction, density, density measurement

## Literatur

- [1] Köppen, D.: Entwicklung eines kontinuierlichen Messverfahrens für die Oberflächendichte von Siliergut. Diplomarbeit am ATB Bornim, Potsdam-Bornim, 2002
- [2] Füll, C., H. Schemel, C. Idler und V. Scholz: Anforderungen an die Logistik zur Sicherung hoher Silagequalitäten. Agrartechnische Forschung 13 (2007), H. 6, S. 214-220
- [3] Häbler, J., R. Tölle, und J. Hahn: Vibrationswalzen zur Verdichtung von Siliergut. LANDTECHNIK 63 (2008), H. 1, S. 28 - 29

Die in den Zeilen 5 bis 9 dargelegten Messverfahren kommen unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte bedingt in Frage.

Das *Penetrometer* ist für die Dichtebestimmung konzipiert und erprobt. Es liefert bei unterschiedlichsten Dichten und Feuchten ein sehr genaues Ergebnis.

Die Erfassung der *Einsinktiefe des Traktors* im Vergleich zum unverdichteten Messgut ist nur bedingt geeignet. Die Erfassung des eigentlichen Messwertes, wenn genügend Konturunterschied vorhanden ist, wäre kein größeres Problem. Da sich der gemessene Wert nicht direkt auf die Dichte bezieht, wird er durch Störgrößen beeinflusst.

Die *radiometrische Sonde* ist für die Dichtebestimmung im und auf dem Futterstock erprobt. Die durchgeführten Untersuchungen [2] ergaben ein sehr genaues und gut zu verarbeitendes Signal für eine Auswertung. Das Messverfahren wird auch in anderen Industriezweigen eingesetzt.

Das *Folien-Druck / Kraftmesssystem* ist ebenfalls nur bedingt einzusetzen, da ein serienreifes Messsystem bei Traktoren noch nicht vorhanden ist. Die Bestimmung des Verdichtungszustandes ist damit aber prinzipiell denkbar.

Die *Ultraschalldickenmessung* ist für eine kostengünstige und genaue Dichte- und Tiefenbestimmung bekannt. Das Messverfahren findet eine breite Anwendung in vielen Zweigen der Industrie. Die erläuterten großen Unterschiede zwischen der Schallübertragung in festen und flüssigen Stoffen und der Übertragung in Luft werden in allen Anwendungsfällen durch eine Luftkompensation vermieden. Die Verwendung zur Dichtebestimmung von Silage ist aber nicht möglich.

Die *Einsinktiefenmessung mit einem Messrad* ist die kostengünstigste und einfachste Möglichkeit zur Bestimmung von Dichteunterschieden. Sie liefert aber keine direkten Werte der Lagerungsdichte. Die Messwerterfassung selbst ist relativ einfach und könnte bei entsprechender Weiterentwicklung einen Lösungsansatz bieten.

Mit *Hochfrequenzfeuchtsensoren* kann die Feuchte in Produkten detektiert werden. Da eine Feuchtebestimmung immer auch von der Dichte des Messgutes beeinflusst wird, wäre eine Kalibrierung nach der Dichte denkbar. Wie aber die Anwendungsfälle gezeigt haben, ist bisher nur eine geringe Eindringtiefe und die alleinige Feuchtebestimmung möglich.

*Mikrowellenstreuungsfeldsonden* zeichnen sich durch eine höhere Eindringtiefe gegenüber den Hochfrequenzfeuchtsensoren aus, wobei diese Eindringtiefe sehr von der Dichte und der Feuchte des Messgutes abhängig ist. Ob sich Mikrowellenstreuungsfeldsonden zum

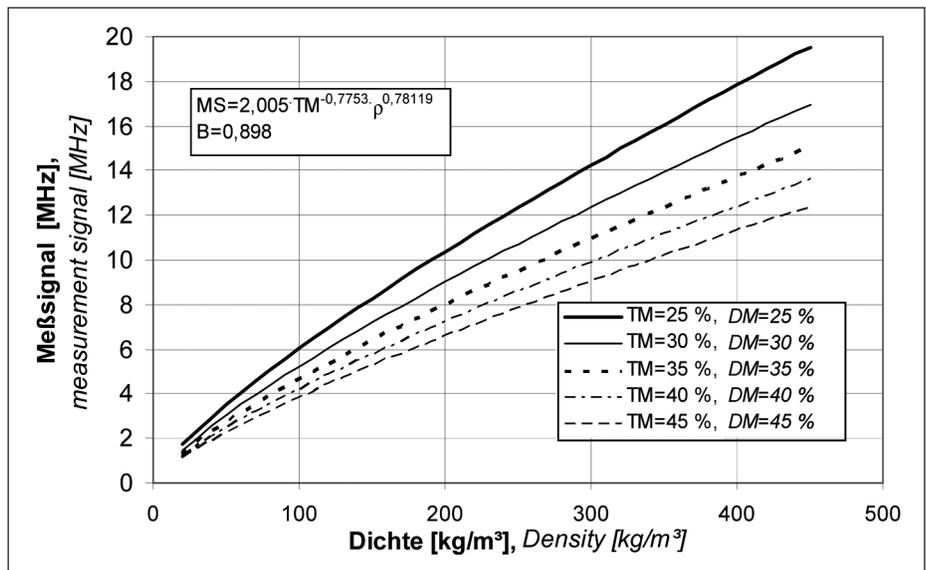


Bild 1: Abhängigkeit des Messsignals MS eines Mikrowellensensors von den Parametern Dichte  $\rho$  und Trockenmassegehalt TM beim Messen der Dichte von elf Silageproben (Mais und Gras)

Fig. 1: Effect of the parameters density  $\rho$  and dry matter content DM on the measuring signal MS of a microwave sensor during measuring the density of eleven silage samples (forage maize and grass)

Erfassen der Dichte oder nur der Feuchte eignen, ist in Versuchen nachzuweisen. Ein Nachteil ist der erforderliche direkte Kontakt des Messkopfes zur Oberfläche.

Eine Vorzugslösung ist das *Georadar* „Gro- und Penetrating Radar“. Der Vorteil gegenüber allen anderen Verfahren ist die Kombination von hoher Eindringtiefe, direkter Dichtebestimmung und Online-Messwerterfassung. Das Georadar arbeitet im niedrigeren Frequenzbereich. Es ist in der Geophysik sehr verbreitet. Gründe hierfür sind die Weiterentwicklung der Prozessorleistung und die relativ niedrigen Preise. Die Eignung speziell für Mais-, Gras- oder andere Silagen mit unterschiedlichsten Dichten und Feuchten muss in Versuchen bestimmt werden.

### V Versuchsergebnisse

Als Vorzugslösungen werden neben den radioaktiven Dichtesonden die Anwendung des Georadars und der Mikrowellenstreuungsfeldsonden gesehen. Zu letzteren wurden Versuche durchgeführt. Da die mit dem Georadar gewonnenen Ergebnisse noch nicht zufriedenstellend sind, weil eine Weiterentwicklung der Software und höherfrequenter Antennen notwendig ist, wird im Folgenden nur über die Ergebnisse aus Versuchen mit Mikrowellenstreuungsfeldsonden berichtet.

Die Versuche wurden mit fünf Maissilagen im Trockenmassebereich  $TM = 26\%$  bis  $37\%$  und sechs Grassilagen mit  $TM = 22\%$  bis  $67\%$  durchgeführt. Die Mikrowellensonde war ein Planarsensor der Fa. TEWS, Hamburg. Die Auswertung ergab statistisch gesicherte Ergebnisse [1]. Das Mess-Signal

wird sowohl von der Dichte wie auch vom Trockenmassegehalt beeinflusst (Bild 1). Die Standardabweichungen sind bei höheren TM-Gehalten deutlich niedriger als bei geringen.

### Schlussfolgerungen

Für die kontinuierliche (Online) oder diskontinuierliche Dichtemessung von Siliergut und Silagen erscheinen einige physikalische Prinziplösungen geeignet zu sein. Die Auswahl der analysierten und teilweise untersuchten Messmethoden unterscheidet sich hinsichtlich direkt oder indirekt bestimmbarer Dichtewerte, Fehlergröße, Handhabung, Aufwand und Preis. Die gewonnenen Ergebnisse berechtigen das Weiterführen der Untersuchungen, um der Landwirtschaft die Kontrolle eines wichtigen Verfahrensparameters während der Silierguteinlagerung zu ermöglichen.