

Hilke Risius und Hubert Korte

Prozessanalytik zur Gutstromtrennung während des Mähdruschs

Getreidebestände zeigen in Abhängigkeit von Standortheterogenität und Bestandesführung neben quantitativen Ertragsdifferenzen oft auch ausgeprägte Qualitätsschwankungen im Erntegut. Ziel des Forschungsprojektes, das im Folgenden vorgestellt wird, ist die Online-Bestimmung qualitätsbestimmender Inhaltsstoffe im Gutstrom von Lebensmittel-, Futter- und Energiegetreide mittels des bewährten Verfahrens der Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS). Angestrebt wird die Trennung von Getreidepartien nach definierten Qualitätsparametern während des Mähdruschs. Damit würde die Voraussetzung geschaffen, dass das Verfahren der qualitätsdifferenzierten Getreideernte zukünftig im Rahmen eines Qualitätssicherungssystems eingesetzt und damit den Forderungen nach einer transparenten Lebens- und Futtermittelproduktion entsprochen werden kann.

Schlüsselwörter:

Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS), Gutstromtrennung, Mähdrusch, multivariate statistische Prozesskontrolle (MSPC)

Keywords

Near-infrared-spectroscopy (NIRS), grain flow separation, combine harvester, multivariate process control charts (MPCC)

Abstract

Risius, Hilke and Korte, Hubert

Process analysis for grain flow segregation on a combine harvester

Landtechnik 65 (2010), no. 1, pp. 34-37, 1 table, 2 figures, 5 references

In addition to quantitative yield variation, grain shows a distinct quality variation depending on small scale heterogeneity as well as crop management. The aim of this collaborative research project is to analyze grain quality by Near-infrared-spectroscopy (NIRS) and to sort grain based on defined quality values during harvesting. Since quality is an essential attribute of agricultural products and produc-

tion processes the possibility of measuring grain quality parameters and separating the grain flow according to defined properties set the stage for implementing the technique of differential grain harvest as part of a quality assurance system.

■ Getreidebestände zeigen in Abhängigkeit von der Standortheterogenität und von Unterschieden in der Bestandesführung eine ausgeprägte Variabilität des Rohproteingehaltes, der entscheidend für die Zuordnung zu Qualitätsgruppen von Weizen und Braugerste ist und somit erheblichen Einfluss auf erzielbare Erlöse hat. Untersuchungen aus dem In- und Ausland zur Online-Messung des Rohproteingehaltes von Getreide während des Mähdruschs haben gezeigt, dass Lage und Verteilung einzelner Qualitätseigenschaften innerhalb eines Schleges mit Hilfe von qualitätsdifferenzierenden Ertragskarten dokumentiert werden können. Publikationen aus Europa, den USA und Australien haben dieses Verfahren ausführlich dargelegt. Diese Arbeiten zur Echtzeitanalyse von Stoffeigenschaften während des Mähdruschs beschäftigen sich mit der Bereitstellung geeigneter Sensorik, deren Kalibrierung, der Erstellung von Proteinkarten sowie der Analyse verschiedener Bewirtschaftungsstrategien zur Qualitätsoptimierung und Homogenisierung der Pflanzenbestände. Die Möglichkeit, die Variabilität von qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffen von Getreide auf einem Schlag zu dokumentieren, ist dadurch hinreichend belegt worden. Um in einem weiteren Schritt dieser gegebenen Standort-

und Bestandesheterogenität zu entsprechen, wird die qualitätsdifferenzierende Getreideernte angestrebt. Bedingung und Grundlage dieses Verfahrens ist die Möglichkeit, mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) Qualitätsparameter von Druschfrüchten in Echtzeit während der Ernte zu erfassen. In einigen Publikationen wird die Möglichkeit der Online-Messung des Proteingehaltes in Verbindung mit einer eigenschaftsdifferenzierten Trennung des Gutstroms während des Mähdruschs diskutiert. Die verfahrenstechnischen Grundlagen dieses Ernteverfahrens wurden in früheren Arbeiten dargestellt [1; 2].

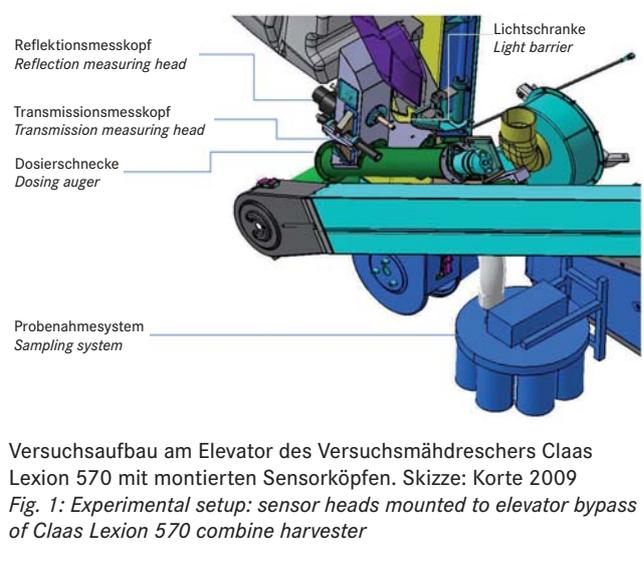
Bei kontinuierlicher Messung, z. B. des Rohproteingehaltes im Gutstrom, müssen so kurze Analysezeiten erreicht werden, dass Aktoren zur Gutstromtrennung in Echtzeit gesteuert werden können. In Verbindung mit einem Probenahmesystem zur Validierung der Sensorkalibrierung soll in dem im Folgenden vorgestellten Forschungsprojekt ein Verfahren zur Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit der Gutströme von Getreide bereitgestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit entwickeln das Fachgebiet Agrartechnik der Humboldt-Universität zu Berlin und die CLAAS SE GmbH gemeinsam in einem Verbundforschungsprojekt ein Ernteverfahren zur Trennung von Getreidepartien nach definierten Qualitätsparametern während des Mähdruschs.

Versuchsaufbau

Die Modifikationen des Mähdreschers für die Versuchsdurchführung betreffen die Baugruppen Kornförderung, Elevator, Befüllung und Korntank. An einer verstellbaren Öffnung im Elevatorschacht befindet sich ein Bypasskanal mit einem Reflexionsmesskopf im Wellenlängenbereich von 960-1650 nm sowie einem Nebkanal mit einem Transmissionsmesskopf im Wellenlängenbereich von 400-1000 nm. Die separierten Gutströme werden am jeweiligen Sensorkopf vorbeigeführt. Beide Messköpfe sind durch Lichtwellenleiter mit dem tec5 Agrospec Spektrometersystem in der Kabine des Mähdreschers verbunden. Eine Dosierschnecke befördert den detektierten Getreidegutstrom zurück in den Elevator bzw. sorgt für die Befüllung der Laborflaschen des Probenahmesystems. Die automatisierte Probenentnahme dient dazu, Rückstellproben für die Kalibrierung und Validierung der installierten NIRS-Sensortechnik zu gewinnen (**Abbildung 1**).

Die mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie generierten Proteinmesswerte werden konvertiert und danach zur Ansteuerung einer hydraulisch geschalteten Weiche genutzt, um die eigentliche Fraktionierung des Getreidegutstromes durch die sogenannte Zwillingsbefüllung im geteilten Korntank zu ermöglichen. Beide Korntankkammern sind durch zwei unabhängig voneinander aktivierbare Systeme entleerbar. Eine Vorfilterung der Spektraldaten wird durch eine Lichtschranke gewährleistet, welche die kontinuierliche Aufnahme der NIR-Spektral- und Analysedaten unterbricht, sobald die Dichte des Gutstroms im Bypass derart abnimmt, dass die Aufnahme aussagekräftiger Spektren nicht mehr gewährleistet ist. Im weiteren Verlauf der Auswertung werden verschiedene Filter eingesetzt, um redun-

Abb. 1



dante und nicht relevante Informationen aus der Datenanalyse auszuschließen. Referenzwerte stellen die Definition der Probeneigenschaften zur Verfügung und dienen dazu, die Laborkalibrierungen zu erweitern und zu validieren. Die im Labor erstellten Kalibriermodelle wurden im Online-Einsatz während der Feldversuche zur Getreideernte 2008 fortwährend mit Hilfe des automatisierten Probenahmesystems validiert.

In Feldversuchen im Juli/August 2008 und 2009 in Brandenburg (Landwirtschaft Golzow Betriebs-GmbH) und Thüringen (Thüringisches Lehr-, Prüf- und Versuchsgut GmbH, Buttstedt) wurde die Funktionsfähigkeit des Versuchsaufbaus erprobt. Es wurden Spektraldaten von Winterweizen und Sommergerste sowohl in diffuser Reflexion als auch in diffuser Transmission mit Hilfe eines NIR-Spektrometers gemessen, das Reflexionsspektren im Wellenlängenbereich von 960-1690 nm und Transmissionsspektren im Wellenlängenbereich von 400-1100 nm aufzeichnet. Die Spektrometersoftware ist so programmiert, dass sowohl Spektraldaten als auch Analysewerte aufgezeichnet werden.

NIRS und automatisierte Probenahme

Zur stationären Erprobung und für die Entwicklung geeigneter Kalibriermodelle wurde das Sensorsystem zunächst im Labor getestet. Für die Entwicklung robuster Kalibrierungen zur Detektion des Rohprotein- und Feuchtegehaltes wurden 518 Weizen- und Gersteproben von 18 Standorten und 30 Sorten verwendet. Die auf diese Weise entwickelten Kalibriermodelle wurden im Online-Einsatz während der Feldversuche zur Getreideernte 2008 und 2009 fortwährend mit Hilfe des automatisierten Probenahmesystems validiert. Die Langzeitstabilität der entsprechenden Kalibriermodelle wird durch die kontinuierliche Überwachung des systematischen Fehlers (bias) gewährleistet. Seit Inkrafttreten der EU Basisverordnung Nr. 178/2002 im Januar 2006 gilt Getreide ab dem Zeitpunkt der Ernte als Lebens- bzw. Futtermittel. Alle

Schritte der Ernteprozesskette und Lagerung müssen diesem hohen hygienischen Anspruch gerecht werden. Weiterhin muss eine lückenlose Rückverfolgbarkeit der Produkte gewährleistet sein. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Beprobung des Ernteguts in einem relativ engen Raster. Um den informationslogistischen Aufwand und eventuelle Verzögerungen im Ablauf der Ernteprozesskette so gering wie möglich zu halten, ist es unabdingbar, sowohl die Probenahme selbst als auch die Kennzeichnung und Datensicherung zu automatisieren.

Im Rahmen des hier beschriebenen Verbundprojektes wird das Probenahmesystem an der Versuchsmaschine zur qualitätsdifferenzierten Getreideernte eingesetzt, um Rückstellproben für die Kalibrierung und Validierung der installierten NIRS-Sensortechnik zu gewinnen. Die Probenahme wird in Abhängigkeit von Durchsatz und Position des Mähdreschers bei Bedarf manuell ausgelöst.

Datenanalyse und -auswertung

In der Prozessanalytik spielt die Datenanalyse eine zentrale Rolle bei der Auswertung der multidimensionalen Informationsmatrix. Die Hauptaspekte der Datenanalyse sind nach Kessler [3] die Trennung von überlagernden Informationen, der Ausschluss der redundanten Informationen, die Herabsetzung der Dimensionen der Informationen, der Ausschluss der nicht relevanten Informationen und die Speicherung und Darstellung von Wissen.

Die multivariate statistische Prozesskontrolle (MSPC) eignet sich in besonderem Maße zur Charakterisierung eines Prozesses, weil hiermit die Korrelation von Variablen analysiert werden kann und gleichzeitig verbesserte Tools zur Fehlerdiagnose zur Verfügung stehen. Um spektrale Ausreißer zu detektieren und Stabilitätsverletzungen des Prozesses anzuzeigen, werden die Prozessdaten mit der Hauptkomponentenanalyse (PCA) klassifiziert und der Vorhersagebereich der Rohproteinwerte, die Einflussfaktoren (Leverage) sowie die Hotelling T^2 Statistik kontinuierlich aufgezeichnet [4].

Ein Maß für die Abweichung innerhalb eines PCA-Modells gibt die Hotelling T^2 Statistik an. Die Größe T^2 berechnet sich aus der Summe der mit den Eigenwerten skalierten quadrierten Scores [5]. Multivariate Regelkarten basieren auf der Definition einer Zielgröße (stabile, optimale Prozessbedingungen), die während des gesamten Mess- und Trennprozesses konstant gehalten werden sollten. Zur Charakterisierung und Diagnose von spektralen Abweichungen ist die MSPC deshalb besonders geeignet.

Der Verlauf der gemessenen Rohprotein (XP)-Werte (%) und der entsprechenden Standardabweichung sind in **Tabelle 1** dargestellt. Im Verlauf des Versuchs wurden insgesamt 26 Referenzproben entnommen und mit den Vorhersagewerten verglichen. Abweichungen der NIRS-Analyseergebnisse oberhalb des Kalibrierfehlers von 0,37 % werden sowohl kontinuierlich online aufgezeichnet als auch im Hotelling T^2 Plot (**Abbildung 2**) angezeigt.

Tab. 1

Vorhergesagter Rohproteingehalt und Vorhersagebereich $yDev$ für Sommergerste (*Hordeum vulgare*), Sorte Christina, 22 ha, Thüringen 2008. Auswertung: Risius 2010

Table 1: Predicted crude protein and prediction intervall $yDev$ for spring barley (*Hordeum vulgare*), breed Christina, 22 ha, Thüringen 2008

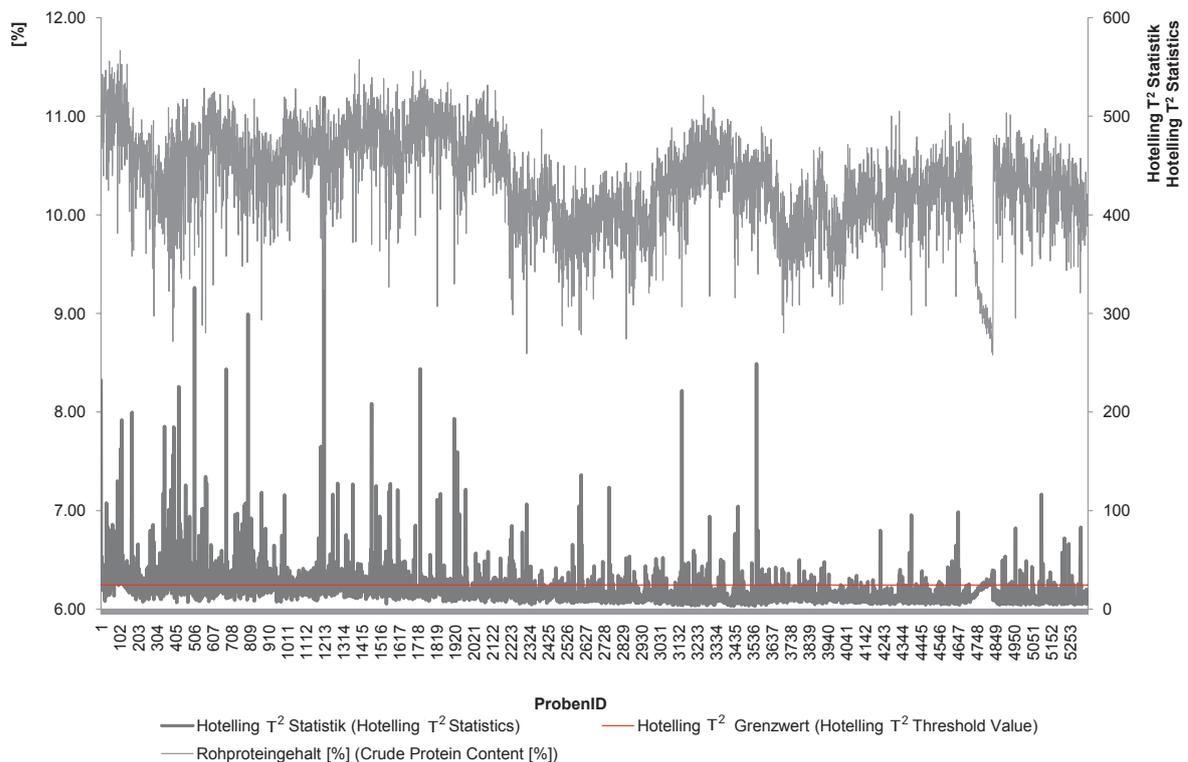
Proben Nr. Sample No.	Vorhergesagter Rohproteingehalt Predicted crude protein [%]	Vorhersagebereich $yDev$ Prediction intervall [%]*	Referenzwert Reference value [%]
71	11,129	0,280	11,649
72	10,603	0,259	10,648
73	10,819	0,260	10,515
74	10,335	0,299	10,317
75	10,081	0,297	10,054
78	9,297	0,299	9,268
79	10,685	0,213	10,618
80	10,425	0,314	10,389
81	10,712	0,216	10,767
82	10,261	0,199	10,091
83	10,205	0,276	11,173
84	9,555	0,328	9,033
85	9,923	0,246	10,365
86	10,015	0,206	9,715
87	10,389	0,219	10,266
88	10,564	0,215	10,560
89	10,033	0,296	9,838
90	10,604	0,188	11,045
91	10,486	0,159	10,605
92	10,317	0,500	10,431
93	10,643	0,218	10,785
94	9,811	0,421	9,816
95	10,372	0,323	11,301
96	10,340	0,335	10,323
97	10,578	0,244	10,578
98	10,176	0,204	10,328
Mittelwert	10,321	0,270	10,403

* Standard Error of Prediction (SEP) = 0,369 %

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren der Nah-Infrarot-Spektroskopie nicht nur zur Online-Detektion von Inhaltsstoffen während des Mähdruschs genutzt werden kann, sondern auch geeignet ist, die Steuerung des Getreidegutstroms nach definierten Qualitätsgrenzwerten zu realisieren. Zur Diagnose der Abweichungen der Vorhersagewerte im Vergleich zur Kalibrierung, der Standardabweichung der Rohproteingehalte sowie

Abb. 2



Hotelling T^2 Statistik und Hotelling T^2 Grenzwert = 24.436, Sommergerste (*Hordeum vulgare*), Sorte Christina, 22 ha, Thüringen 2008 (Risius 2010)

Fig. 2: Hotelling T^2 Statistics and hotelling T^2 threshold value = 24.436, spring barley (*Hordeum vulgare*), breed Christina, 22 ha, Thüringen 2008

der Hotelling T^2 Statistik kann festgestellt werden, dass diese primär durch Veränderungen der Spektraldaten verursacht werden. Eine Spektrenaufnahme unter gleichbleibenden optimierten Bedingungen, wie sie unter Laborbedingungen und in der Anwendung der PAT in der pharmazeutischen Industrie gefordert wird, kann im Feldeinsatz nicht gewährleistet werden. Spektrale Abweichungen müssen kontinuierlich aufgezeichnet und analysiert werden, um zu vermeiden, dass Fehler in den Vorhersagewerten zu einer Fehlbefüllung der Korntankkammern führen.

Für die Stabilität der Online-Analyse und die Trennung des Getreidegutstroms nach definierten Parametern scheint ein Monitoring weiterer Prozessparameter notwendig zu sein, die Einfluss auf die Prozessanalytik haben. Dazu zählt die Überwachung physikalischer Qualitätsparameter wie Partikelgröße, Tausendkornmasse (TKM), Bruchkornanteil, Fremdbesatz, Farbveränderungen usw. mittels bildgebender Verfahren, welche zusätzlich zur Überwachung der Maschineneinstellungen genutzt werden könnten. Die Integration bildgebender Verfahren wäre zusätzlich zur Analyse von möglichen Fusarium- bzw. Mykotoxinbelastungen verwendbar. Mit der kontinuierlichen Weiterentwicklung von NIR-Spektrometern wäre es zukünftig denkbar, relevante Qualitätsparameter inline zu analysieren und mit der Ertragsmessung zu kombinieren.

Mit der Möglichkeit, Qualitätsparameter im Erntegut zu erfassen und eine Gutstromtrennung nach Stoffeigenschaften durchzuführen, wird die Voraussetzung geschaffen, dass das

Verfahren der qualitätsdifferenzierten Getreideernte zukünftig im Rahmen eines Qualitätssicherungssystems eingesetzt und damit den Forderungen nach einer transparenten Lebens- und Futtermittelproduktion entsprochen werden kann.

Literatur

- [1] Risius, H.: Verfahrenstechnische Grundlagen der selektiven Getreideernte. Masterarbeit. Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Pflanzenbauwissenschaften, Fachgebiet Agrartechnik, 2006
- [2] Risius, H.: Verfahrenstechnische Grundlagen der selektiven Getreideernte. Landtechnik 62 (2007), H. 5, S. 354
- [3] Kessler, R. W. (Hrsg.): Prozessanalytik - Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2006
- [4] Li Vigni, M. et al.: Near Infrared Spectroscopy and multivariate analysis methods for monitoring flour performance in an industrial bread-making process. Analytica Chimica Acta 642 (2009), no. 1-2, pp. 69-76
- [5] Yang, K. and Trewn, J.: Multivariate Statistical Methods in Quality Management. Irwin-McGraw Hill, New York, 2004

Autoren

M.Sc. Hilke Risius ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Biosystemtechnik der Humboldt-Universität zu Berlin, Philippsstr.13, 10115 Berlin, E-Mail: hilke.risius@agr.ar.hu-berlin.de. Leiter des Verbundforschungsprojektes ist **Prof. Dr. Jürgen Hahn**.

Dr.-Ing. Hubert Korte ist der Leiter der Abteilung Vorentwicklung Mäh-drescher/Feldhäcksler der CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Münsterstr. 33, 33426 Harsewinkel.

Danksagung

Das Vorhaben wird gefördert aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung.