

Durchsatzermittlung zur Ertragskartierung im Feldhäcksler

Throughput Measurement for Yield Mapping in Forage Harvesters

Detlef Ehlert

Institut für Agrartechnik Bornim e.V.

Kurzfassung: Mit Ertragskartierungseinrichtungen ausgerüstete Feldhäcksler können einen wichtigen Beitrag zur Erfassung der ortsdifferenzierten Ertragsfähigkeit innerhalb eines Schlages im Rahmen der teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion leisten. Dafür sind kostengünstige und hinreichend genaue technische Lösungen zu entwickeln. Durch Messen des Spaltes zwischen Preßwalze und Glattwalze vor der Schneidtrommel kann ein dem momentanen Gutdurchsatz entsprechender Meßwert gewonnen werden, der unter Einbeziehen weiterer Größen das Erstellen von Ertragskarten ermöglicht. Mit diesem volumetrischen Meßprinzip werden Genauigkeiten erreicht, die eine Aussage zur ortsbezogenen relativen Ertragsfähigkeit gestatten.

Deskriptoren: Feldhäcksler, Ertragskartierung, Sensor

Abstract: Forage harvesters equipped with yield mapping devices can make an essential contribution to surveying site-specific assessment of fertility within a field for precision farming. Low-cost technical solutions with sufficient accuracy are to be developed for this purpose. By measuring the distance between the feed rollers in front of the cutting drum combined with other measured values, material flow can be estimated and furthermore yield maps can be calculated. With this volumetric measurement, an accuracy which satisfies the demands for relative yield mapping can be achieved.

Keywords: forage harvester, yield mapping, sensor

1 Einleitung

Nach den Mähdruschfrüchten weist das Halmfutter einschließlich des Grünmaises die zweitgrößte Anbaufläche auf [1]. Da diese Futterpflanzen vorrangig in gehäckselter Form zur Silageproduktion verwendet werden, könnten wesentliche Anteile (ca. 15,5 %) der Ackerflächen im Rahmen von Ertragskartierungen in Feldhäckslern hinsichtlich der Ertragsfähigkeit bewertet werden. Trotz des erheblichen mit Feldhäckslern abgernten Flächenanteils müssen bei der Entwicklung von Technik zur Ertragskartierung kostengünstige Lösungen mit hinreichender Genauigkeit angestrebt werden. Zur Zeit wird von der Landmaschinenindustrie noch kein Feldhäcksler mit der Möglichkeit der Ertragskartierung auf dem Markt angeboten. Aus dem Bereich der Forschung und Entwicklung sind Lösungsansätze bekannt. Vansichen und De Baerdemaeker [2] berichten über Meßeinrichtungen zur Ertragskartierung im Feldhäcksler. Es werden die momentanen Durchsätze auf der Grundlage tensiometrischer Drehmomentenmessungen am Hauptantrieb und an der Gebläsewelle bestimmt. Auernham-

mer et al. [3,4] unterbreiten Vorschläge zu Sensorausstattungen für die lokale Ertragsermittlung und machen Angaben zu auftretenden Fehlern bei Anwendung eines radiometrischen Meßprinzips mit zusätzlicher Erfassung der Gutgeschwindigkeit im Auswurfbogen eines selbstfahrenden Feldhäckslers. Von der Waydbrink [5] führte vergleichende Untersuchungen über vier Meßmethoden zur Durchsatzermittlung in einem selbstfahrenden Feldhäcksler durch, um eine masseproportionale Siliermitteldosierung zu ermöglichen. Kromer [6], Harfensteller und Voss [7], Ihle und Dorniß [8] untersuchten Zusammenhänge zwischen mittlerer Preßstranghöhe und Durchsatz bei Feldhäckslern.

2 Meßprinzip

Unter Berücksichtigung der o.g. speziellen Anforderungen bei der Durchsatzermittlung zur Ertragskartierung im Feldhäcksler und der Angaben in der Fachliteratur erscheint das Messen des Spaltes zwischen der Glattwalze und der Preßwalze als ein akzeptabler Kompromiß zwischen technischem Aufwand und erreichbarer Ge-

nauigkeit (Bild 1). Da Feldhäcksler i.d.R. den Gutstrom mit Walzen verdichten, kann dieses Meßprinzip unabhängig vom Häckslertyp angewendet werden [9].

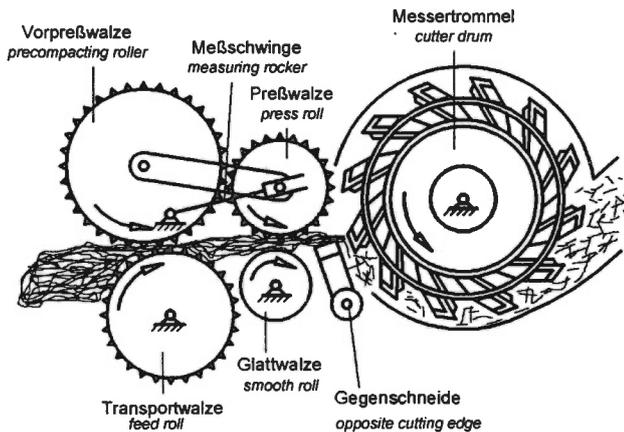


Bild 1: Prinzipdarstellung der Spaltweitenmessung im Feldhäcksler

Fig. 1: Principle of feed roller clearance measurement in forage harvester

In der ersten Untersuchungsphase, in der ausschließlich Standardfeldmeßtechnik des ATB zum Einsatz kam, wurde zum Messen der Spaltweite eine Meßschwinge (Bild 1) mit einem inkrementalen Winkelgeber (5400 Impulse/Umdrehung) bei zwei selbstfahrenden Feldhäckslern (Claas-Jaguar 682 SL in der Agrargenossenschaft Pessin und Claas-Jaguar 695 SL/S in der Landwirtschaft Golzow Betriebs-GmbH) installiert. Die Verarbeitung des Winkelgeber-Meßsignals erfolgte ohne Filterung bei einer Erfassungsfrequenz von 10 Hz mit Hilfe einer Rechnereinschubkarte Modular-4 der Fa. Sorcus sowie Software Argus 2.1 zur Visualisierung und Speicherung von der Fa. Argus. Beide Häcksler hatten baugleiche Vorguppen für die Gutzuführung zur Häckseltrommel. Die Federkonstante der beiden verwendeten Zugfedern betrug je 6,5 N/mm. Bei minimaler Auslenkung von ca. 8 mm betrug die Preßkraft 520 N und bei 100 mm wurden 2320 N erzeugt.

Zusätzlich wurden die Position auf dem Schlag mit einem DGPS-Satellitenortungssystem, die Drehzahl der Preßwalze, sowie die Fahrgeschwindigkeit des Feldhäckslers in digitaler Form gemessen (Bild 2).

Auf der Grundlage der genannten Meßgrößen war es unter Verwendung eines Excel- Auswerteprogramms sowie eines Geographischen Informationssystems (GIS) möglich, Ertragskarten für Halmfütterkulturen zu erstellen sowie statistische Auswertungen vorzunehmen.

Zum Nachweis der prinzipiellen Funktionsfähigkeit der entwickelten Meßeinrichtung wurden Voruntersuchungen beim Häckseln von angewelktem Gras durchgeführt. Die anschließenden Untersuchungen zu den Beziehungen zwischen Spaltweite und Durchsatz sowie die durchgeführten Ertragskartierungen erstreckten sich auf die Ernte von Sommergerste-Ganzpflanzen und Grünmais zur Silagegewinnung.

Basierend auf den in der ersten Untersuchungsphase erreichten Ergebnissen wurde in einer zweiten Untersuchungsphase unter Beibehalten des Spaltmeßprinzips in enger Zusammenarbeit mit der Fa. Claas im Golzower Feldhäcksler das AgroCom-Terminal (ACT) mit dem Feldhäcksler-Ertragsmeß-Modul (FEM) und Bordinformator-Modul (ACB) eingesetzt.

3 Ergebnisse

Mehrjährige Messungen bei den genannten drei Gutarten erbrachten den Nachweis eines jeweils linearen Zusammenhangs zwischen der mittleren Schichtdicke s , gemessen als Spaltweite zwischen der Preßwalze und der Glattwalze, und dem Durchsatz \dot{m} (Tabelle 1).

Lineare Regressionsrechnungen vom Typ $\dot{m} = a * s$ in Excel erreichten mit diesen Werten Bestimmtheitsmaße von 0,46 bis 0,89 (Tabelle 1, Bild 3). Eine Einzelmessung, in Bild 3 als ein Punkt dargestellt, besteht aus einer Fahrzeugeinheit mit einem oder zwei Anhängern, je nach betrieblichen Bedingungen. Die voneinander abweichenden Anstiege a der Geradengleichungen sind auf die unterschiedlichen Trockenmassegehalte, Gutarten und Einstellungen der theoretischen Häcksellänge zurückzuführen. Mit Regressionsgleichungen vom Typ $\dot{m} = a * s + \dot{m}_0$ errechnete Bestimmtheitsmaße schwanken zwischen 0,46 und 0,94 und sind damit nur als geringfügig besser zu beurteilen. Die Schnittpunkte \dot{m}_0 mit der y-Achse bewegten sich in einem relativ schmalen Intervall von +2,86 kg/s bis -3,66 kg/s. Diese Ergebnisse sprechen dafür, daß für ähnliche Einsatzbedingungen eine annähernd gleiche Gutdichte zwischen den Walzen entsteht.

Aus einer beispielhaften Darstellung der Häufigkeitsverteilungen der Erträge bei Sommergerste zur Ganzpflanzensilageproduktion wird ersichtlich (Bild 4), daß auch hier, wie bei durchgeführten Ertragskartierungen mit Mähdreschern, erhebliche Ertragschwankungen auftreten.

Versuch: 1

Versuchsphase: Phase 1

Versuchsdatum: 19.07.1994

Startzeit: 07:04:07

Endzeit: 07:17:10

Versuchsdauer: 00:13:03

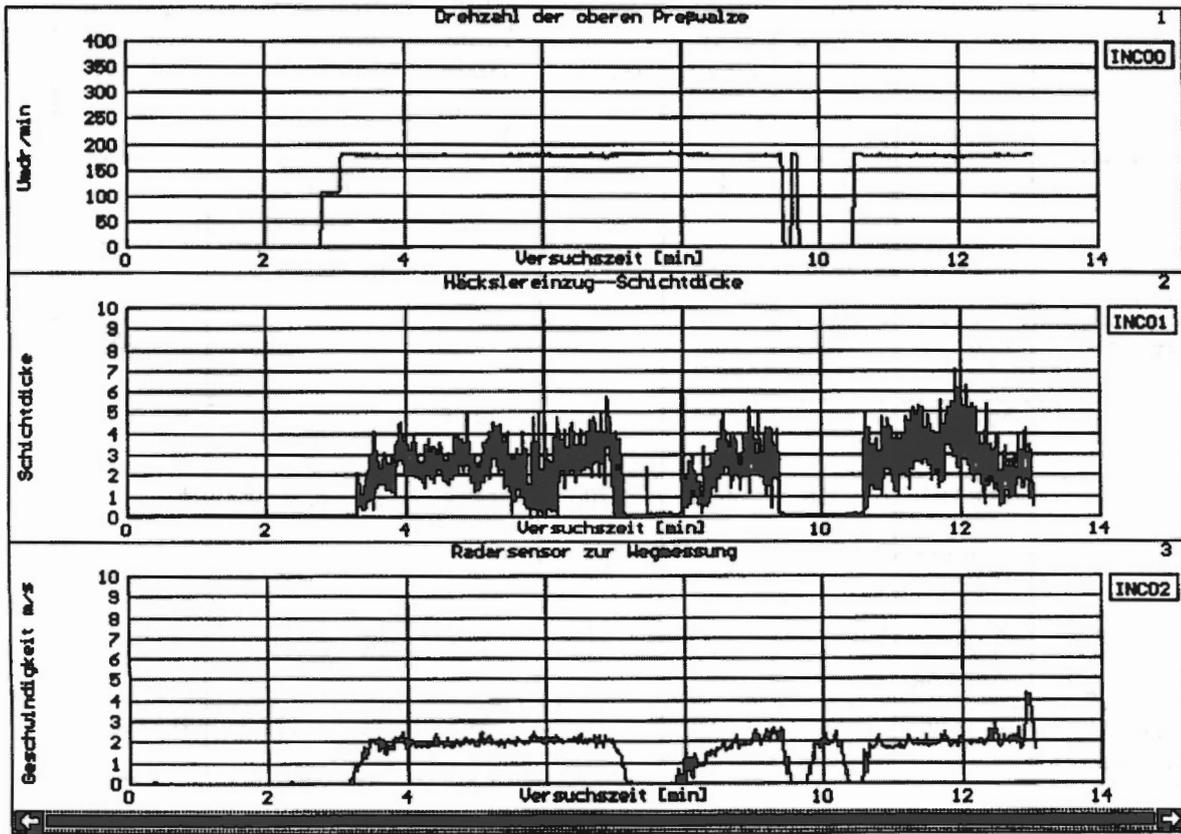
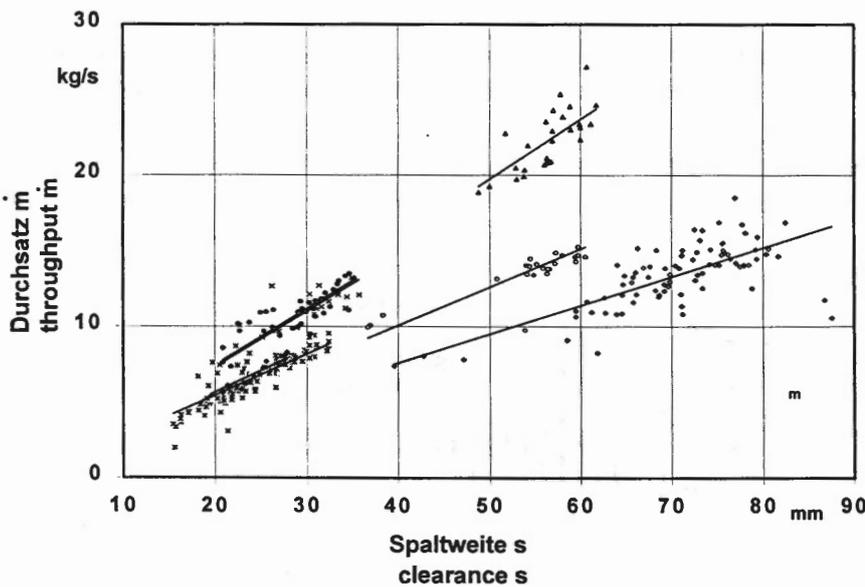


Bild 2: Beispiel für die Messung von Preßwalzendrehzahl, Schichtdicke und Fahrgeschwindigkeit über eine Anhängerladung in Sommergerste

Fig. 2: Example of measurement of feed roller rotation speed, clearance and travel speed for a trailer in spring barley



- × Sommergerste (spring barley) $\dot{m} = 0,366 \cdot s$
- × angewelktes Gras (wilted grass) $\dot{m} = 0,274 \cdot s$
- Mais (maize) $\dot{m} = 0,190 \cdot s$
- Sommergerste (spring barley) $\dot{m} = 0,284 \cdot s$
- ▲ Silomais (maize) $\dot{m} = 0,395 \cdot s$
- Sommergerste (spring barley) $\dot{m} = 0,252 \cdot s$
- Sommergerste (spring barley) $\dot{m} = 0,373 \cdot s$

Bild 3: Durchsatz in Abhängigkeit von der Spaltweite

Fig. 3: Throughput as a function of feed roller clearance

Tabelle 1: Statistische Angaben zur ortskorrelierten Ertragserfassung im Feldhäcksler
 Table 1: Statistics for site-specific yield measurements in forage harvester

| | Ernte- termin | Ernte- massen | Mittl. TM- gehalte | Anzahl der Mes- sungen | Mittl. Ernte- masse pro Messung | Regressions- gleichungen | Bestimmt- heitsmaße |
|------------------------------------|---------------------|------------------|--------------------------|------------------------------|---|------------------------------|------------------------|
| Einheiten | - | dt | % | - | dt | \dot{m} in kg/s s in mm | - |
| Angewelktes Gras, Pessin | 01.06.94 | 2830 | 46,0 | 98 | 28,8 | $\dot{m} = 0,274 \cdot s$ | B = 0,72 |
| Sommergerste, Golzow | 19.07.94 | 2051 | 51,3 | 19 | 107,9 | $\dot{m} = 0,366 \cdot s$ | B = 0,52 |
| Silomais, Golzow | 29.09.94 | 4463 | 40,3 | 26 | 171,6 | $\dot{m} = 0,395 \cdot s$ | B = 0,55 |
| Sommergerste, Golzow | 13.07.95 | 2216 | 44,3 | 20 | 110,8 | $\dot{m} = 0,252 \cdot s$ | B = 0,88 |
| Silomais, Pessin | 18.09.95 | 5318 | 32,4 | 89 | 59,8 | $\dot{m} = 0,190 \cdot s$ | B = 0,46 |
| Sommergerste, Golzow, Schlag 3 | 03.08.- 04.08.96 | 1950 | 58,0 | 41 | 47,6 | $\dot{m} = 0,373 \cdot s$ | B = 0,64 |
| Sommergerste, Golzow, Schlag 21 | 03.08.96 | 346 | 60,0 | 9 | 38,4 | $\dot{m} = 0,284 \cdot s$ | B = 0,89 |

Ein ähnliches Ergebnis erbrachte die Ertragserfassung bei Silomais (Bild 4). Die Häufigkeitsverteilung der Ertragsklassen ist in diesem Fall zweigipfelig mit einem deutlich höheren Mittelwert. Bildet man den Quotienten aus den Erntemassen und den dazugehörigen Ernteflächen, so ergibt sich bei der Sommergerste ein Durchschnittsertrag von 114 dt/ha. Nach der Häufigkeitsverteilung im Bild 4 wurde nur ein Durchschnittsertrag von 105 dt/ha errechnet. Diese Differenz von ca. 8 % ist auf die nicht vollständige Ausnutzung der möglichen Schnittbreite zurückzuführen. Infolge der Reihenbindung des Maisgebisses trat diese Differenz beim Silomais nicht auf.

Bei der Ertragskartierung in Mähdre-
schern wird in der Regel auf Grund
wenig variierender Eigenschaften der
Körner vorkalibriert. Halmgut weist
dagegen bei abweichenden Trocken-
massegehalten sehr unterschiedliche
Lager- bzw. Preßdichten auf. Infolge
des Meßprinzips würde bei trockenem
Gut zu viel und bei feuchtem Gut zu
wenig Frischmasse (FM) ausgewiesen
werden. Dieses läßt sich durch die 1996
beim Häckseln von Sommergerste

durchgeführten Untersuchungen belegen. Zur Kalibrie-
rung der Ertragsmeßeinrichtung wurde die Anzeige des
AgroCom-Terminals nach acht Anhängern gehäckselter
Gerste kalibriert. Ein Vergleich der an den Folgetagen
auf dem Terminal abgelesenen Werte zur geernteten
Masse mit den durch Wägung ermittelten Werten ergab
eine zunehmende Abweichung (Bild 5, oben). Durch
Nachkalibrieren auf der Grundlage aller vorher durchge-
führten Messungen und der damit verbundenen Korrektur
wurde deutlich, daß durch das Terminal zuerst zu
wenig Frischmasse und zum Ende zu viel Frischmasse
angezeigt wurde (Bild 5, unten). Dieser Trend ist offen-

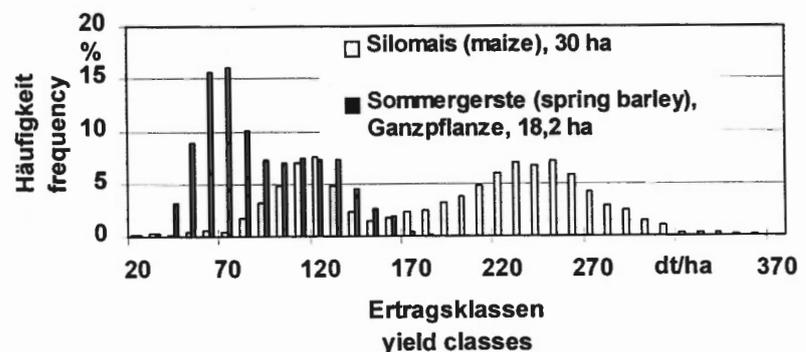


Bild 4: Häufigkeitsverteilungen der Erträge bei Sommergerste und Silomais
 Fig. 4: Frequency distributions of yields in spring barley and maize

sichtlich auf das Reifen der Gerste und auf den damit steigenden Trockenmassegehalt zurückzuführen. Auf Grund der Guteigenschaften verdichteten Halmgutes [10] ist zu erwarten, daß das gewählte Meßprinzip die Trockenmasse (TM) besser als die Frischmasse wiedergibt. Mit dieser Eigenschaft würde der begründeten Forderung nach Erfassung des teilflächenspezifischen Trockenmasseertrages zur Bewertung der Ertragsfähigkeit von landwirtschaftlich genutzten Flächen besser Rechnung getragen werden. Bereits Ihle und Dorniß [8] ermittelten einen Zusammenhang zwischen der Schütt- oder Preßdichte (Frischmasse) ρ_{FM} für Roggen und Gras und dem Trockenmassegehalt TMG in der Form

$$\rho_{FM} = \frac{k}{TMG},$$

wobei keine Konstante ist.

Wird die Trockenmassedichte ρ_{TM} errechnet, indem die Frischmassedichte ρ_{FM} mit dem Trockenmassegehalt TMG multipliziert wird:

$$\rho_{TM} = \left(\frac{k}{TMG} \right) \times TMG = k,$$

so zeigt sich, daß sie nicht mehr vom Trockenmassegehalt abhängt und damit konstant ist.

Ihle und Dorniß [8] führten weiterhin Untersuchungen an einem Fortschritt-Feldhäcksler zum volumetrischen Meßprinzip durch und geben einen mittleren Fehler des Durchsatzes, bezogen auf den Mittelwert der gemessenen Durchsatzwerte, von $\pm 8\%$ an.

Um diesen Sachverhalt näherungsweise für die eigenen Untersuchungen zu überprüfen, wird verglichen, wie die aus dem Terminal abgelesenen Werte mit den durch Wägung ermittelten Lademassen auf den Anhängern hinsichtlich der Frischmasse und Trockenmasse übereinstimmen. Werden die relativen Differenzen zwischen den Meßwerten im Häcksler und der Waage bei der Frischmasse und der Trockenmasse gebildet, so ergibt sich für die Frischmasse eine Standardabweichung der

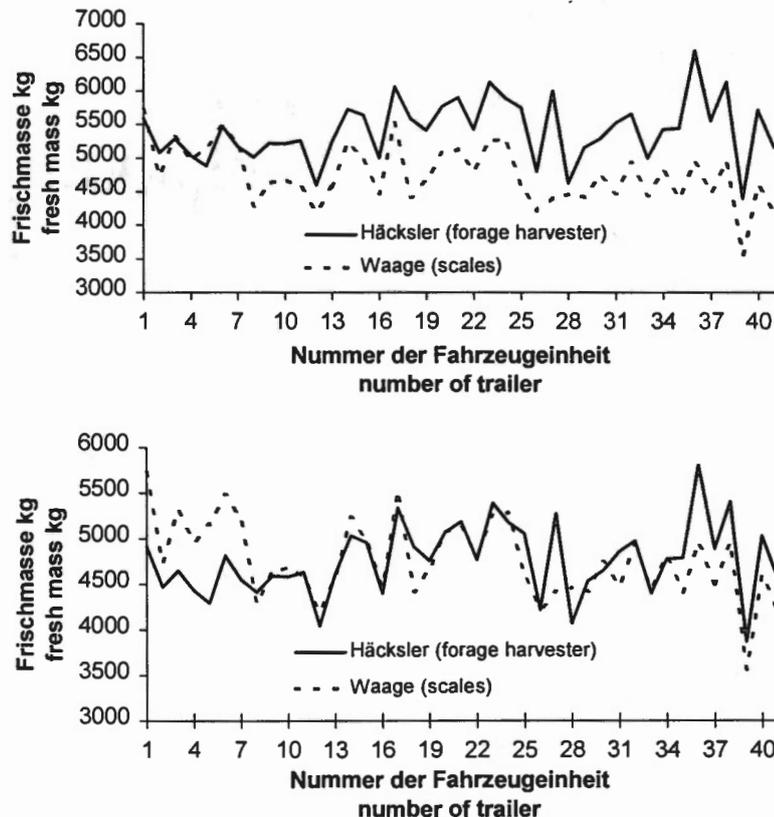


Bild 5: Vergleich von durch Häcksler und Waage ermittelte Anhängerzuladungen hinsichtlich der Frischmasse

Fig. 5: Comparison of fresh mass trailer loads determined by forage harvester and by weighing machines

relativen Differenzen von 8,23% und für die Trockenmasse eine Standardabweichung der relativen Differenzen von 5,91%. Durch die um 2,32% geringere Standardabweichung der Trockenmasse wird die aufgestellte These auf der Grundlage der Meßdaten gestützt (Bild 6). Die von Auernhammer et al. [3,4] angegebene Standardabweichung der relativen Meßfehler bei der Ertragsermittlung von Silomais im selbstfahrenden Feldhäcksler nach dem radiometrischen Meßprinzip beträgt 3,3 % bezogen auf die Frischmasse. Damit erreicht das radiometrische Meßprinzip für die Frischmasseerfassung höhere Genauigkeiten als die Spaltweitenmessung. Bei der Bewertung der Meßgenauigkeiten für die Ertragskartierung muß berücksichtigt werden, daß die Ertragswerte für je ein Pixel zur Erstellung der Ertragskarte aus wesentlich weniger durchgesetzter Gutmenge ermittelt werden als für eine Anhängerladung. Es ist deshalb davon auszugehen, daß die relativen Meßfehler für die Ertragskarteneinzelwerte höher als die aus den Anhängerwägungen errechneten sind. Ihre exakte Ermittlung ist nur durch versuchstechnisch relativ aufwendige Untersuchungen möglich.

4 Bewertung und Schlußfolgerungen

Die ortskorrelierte Darstellung der gemessenen Erträge in der Sommergerste und des Silomaises belegt, daß die kartierten Flächen trotz einheitlicher Bewirtschaftung erhebliche Ertragsdifferenzen aufweisen (Bild 7).

Durch die vorliegenden Versuchsergebnisse wird nachgewiesen, daß die relative Ertragserfassung mit Feldhäckslern auf der Grundlage der Messung der Spaltweite zwischen der Glattwalze und der Preßwalze möglich ist. Zur exakten Ertragskartierung müßte der Trockenmasseertrag ausgewiesen werden. Dies setzt eine genaue laufende Erfassung des Trockenmassegehaltes voraus, die technisch noch nicht gelöst ist. Da Ertragskartierungen zur Heterogenitätserfassung innerhalb eines Schlags sich auf nur eine Gutart mit relativ einheitlichem Trockenmassegehalt beziehen, ist eine Relativaussage mit begrenzter Aussagekraft über die einzelnen Teilflächen möglich. Die dabei notwendigen zusätzlichen technischen Aufwendungen sind gering, wenn die Satellitenortungstechnik vorhanden ist. Zur Erhöhung der Aussagesicherheit und Bewertung der erreichbaren Genauigkeit, auch unter dem Aspekt von durch die Herstellerfirma verbesserten Komponenten des Meßsystems, sind weiterführende Untersuchungen erforderlich. Bei der Markteinführung müßten durch die Herstellerfirma präzisierete Anleitungen zu Grundeinstellungen und zur Kalibrierung gegeben werden, die dann je nach Schwierigkeitsgrad von den Landwirten oder dem Kundenservice umzusetzen wären.

Die quantitative Ertragserfassung nach Original- und Trockenmasse als Mittel exakter Abrechnungen und für eine verbesserte Ertragskartierung sollte als zukünftig zu lösende Forschungsaufgabe eingeordnet werden.

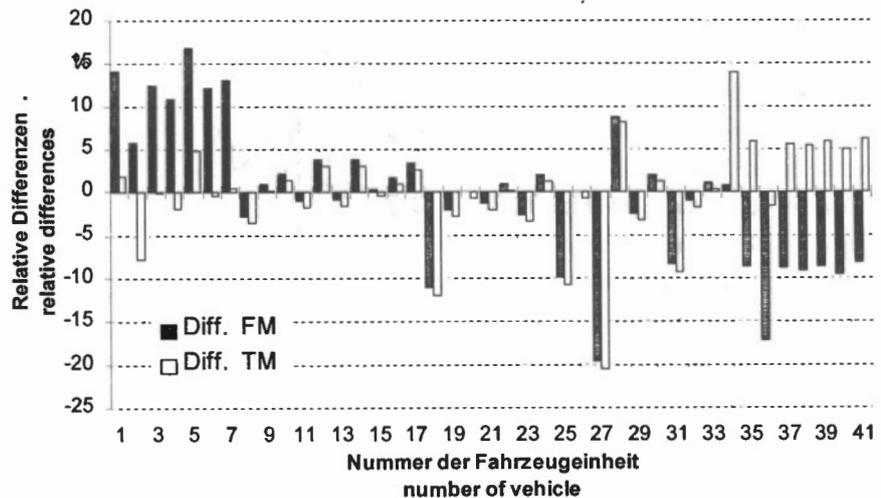


Bild 6: Relative Differenzen von Frisch- und Trockenmasse
Fig. 6: Relative differences in fresh and dry mass

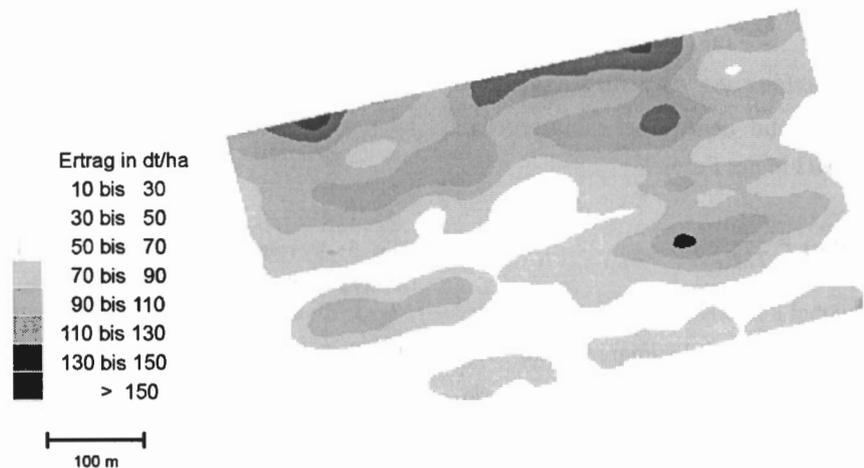


Bild 7: Beispiel einer Ertragskarte des Feldhäckslers in Sommergerste, Golzow, Schlag 40, kartierte Fläche: 18,2 ha
Fig. 7: Example of forage harvester yield map in spring barley

Literatur

- [1] N.N.: Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Landwirtschaftsverlag Münster-Hiltrup, 1997
- [2] Vansichen, R.; De Baerdemaeker, J.: A Measurement Technique for Yield Mapping of Corn Silage. J. agric. Eng. Res. (1993) 55, S. 1-10
- [3] Auernhammer, H.; Demmel, M.; Muhr, Th.; Rottmeier, J.; Wild, K.: Site Specific Yield Measurement in Combines and Harvesting Machines. AgEng Milano, August 29 - September 1, Report N. 94-D-139, 1994
- [4] Auernhammer, H.; Demmel, M.; Pirro, P.J.M.: Durchsatz- und Ertragsmessungen im selbstfahrenden Feldhäckslern. VDI Berichte 1356, S. 135-138, 1997
- [5] Von der Waydbring, E.: Untersuchungen zur durchsatzabhängigen Dosierung an Feldhäckslern. Dissertation, Universität Rostock, 1993

[6] Kromer, K.-H.: Untersuchungen am Trommelfeldhäcksler unter besonderer Berücksichtigung der Materialförderung in und nach Schneid-Wurf-Trommeln. KTL-Bericht über Landtechnik Nr. 114, 1967

[7] Harfensteller, G.; Voss, E.: Untersuchungen zur Zerkleinerung und Förderung von Halmgut. Forschungsbericht, Universität Rostock, 1986

[8] Ihle, G.; Dorniß, W.: Untersuchungen zur Mechanischen Messung des Durchsatzes am selbstfahrenden Feldhäcksler. Agrartechnik 27 (1977) 6, S. 265-266.

[9] Ehlert, D.; Schmidt, H.: Ertragskartierung mit Feldhäckslern. Landtechnik 50 (1995) 4, S. 204-205

[10] Kutzbach, H-D.: Die Grundlagen der Halmgutverdichtung. Fortschrittberichte der VDI Zeitschriften, 1972, Reihe 14, Nr. 16