

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Arbeitskreises Forschung und Lehre der

Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

305

Peter Reitz

Untersuchungen zur Ertragskartierung während der Getreideernte mit dem Mähdrescher

Dissertation

Stuttgart 1997

**Untersuchungen zur Ertragskartierung
während der Getreideernte mit dem Mähdrescher**

Von der Fakultät Energietechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Peter Reitz
aus Heide/Holstein

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. H. D. Kutzbach
Mitberichter: Prof. Dr.techn. F. Beisteiner

Tag der Einreichung: 19.12.1996

Tag der mündlichen Prüfung: 18.04.1997

Institut für Agrartechnik
Stuttgart 1997

D 93

Copyright 1997

im Selbstverlag

Peter Reitz

Bezugsquelle: Institut für Agrartechnik
 Universität Hohenheim
 Garbenstraße 9
 70599 Stuttgart

Alle Rechte, auch die der Übersetzung und des Nachdrucks sowie jede Art der photomechanischen Wiedergabe, auch auszugsweise, bleiben vorbehalten.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1991 bis 1996 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim.

Herr Prof.Dr.-Ing. H.D. Kutzbach hat die Arbeit angeregt und wissenschaftlich betreut. Mit der Überlassung des Themas gab er mir die Möglichkeit, ein Forschungsvorhaben unter hervorragenden Arbeitsbedingungen selbständig zu bearbeiten. Für das entgegengebrachte Vertrauen danke ich Herrn Professor Kutzbach ganz herzlich.

Herrn Prof.Dr.techn. F. Beisteiner danke ich für die Durchsicht der Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Bei allen Mitarbeitern des Instituts für Agrartechnik sowie der Versuchsstationen der Universität Hohenheim bedanke ich mich für die gute und engagierte Zusammenarbeit. Dieser Dank gilt auch den Technischen Assistentinnen und den vielen wissenschaftlichen Hilfskräften, die durch ihre Mithilfe bei der Durchführung der Feldversuche entscheidend zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Meine Kollegen haben mir durch Anregungen, Diskussionen und ihre bereitwillige Unterstützung bei den Versuchen stets dabei geholfen, die vielen kleinen und großen Probleme als Herausforderungen anzusehen. Hierfür und für ihre Freundschaft sei Ihnen allen gedankt. Dies gilt besonders für meine damalige Kollegin Frau Dipl.-Ing.agr. Petra Schirmer, die mir jetzt als Ehefrau mit Rat und Tat zur Seite steht.

Hohenheim, im Mai 1997

Peter Reitz

Inhalt

Formelzeichen	VII
Zusammenfassung	XI
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	8
2.1 Meßverfahren zur Ertragskartierung	8
2.1.1 Positionsbestimmung	8
2.1.2 Durchsatzmessung	12
2.1.3 Schnittbreitenmessung	18
2.2 Modellierung der Gutströme	20
2.3 Durchsatzregelung	22
3 Theoretische Grundlagen	25
3.1 Erfassung geokodierter Kornertragsdaten	25
3.2 Betrieb des Mähdreschers mit geokodierten Teilflächendaten	34
4 Aufbau und Funktion der verwendeten Meßeinrichtungen	40
4.1 Anforderungen	40
4.2 Positionsbestimmung	41
4.3 Bestimmung des Korndurchsatzes	46
4.3.1 Korndichtemessung	47
4.3.2 Kornvolumenstrommessung	53
4.3.3 Kornfeuchtemessung	57
4.4 Weg-/Geschwindigkeitsmessung	58
4.5 Schnittbreitenmessung	60
4.6 Versuchsmähdrescher	62
5 Untersuchungen zum Einsatzverhalten der Meßeinrichtungen	64
5.1 Positionsbestimmung	64
5.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung	64
5.1.2 Ergebnisse	66

5.2 Bestimmung des Korndurchsatzes	73
5.2.1 Laborversuche	73
5.2.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung	73
5.2.1.2 Untersuchung der Korndichtemeßeinrichtung	77
5.2.1.3 Untersuchung der Kornvolumenstrommeßeinrichtung	80
5.2.1.4 Untersuchung der Kornfeuchtemeßeinrichtung	86
5.2.1.5 Einflüsse auf die Kornmassenstromberechnung	88
5.2.2 Feldversuche	91
5.2.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung	91
5.2.2.2 Ergebnisse	92
5.3 Weg-/Geschwindigkeitsmessung	97
5.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung	97
5.3.2 Ergebnisse	97
5.4 Schnittbreitenmessung	100
5.4.1 Laborversuche	100
5.4.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung	100
5.4.1.2 Ergebnisse	101
5.4.2 Feldversuche	103
5.4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung	103
5.4.2.2 Ergebnisse	103
5.5 Bestimmung der Durchlaufzeiten	105
5.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung	105
5.5.2 Ergebnisse	106
5.6 Betrachtung der Abweichungen bei der Ertragskartierung	108
6 Ertragskartierung	110
7 Ertragsvorausberechnung	118
8 Ausblick	125
9 Literatur	127

Formelzeichen

A	m ²	Fläche
Ā	m ² /s	Flächenleistung
a _i	-	Konstanten zur Berechnung des Kornvolumenstroms
a _{SB}	m	Abstand zwischen Schneidwerks- und Bestandskante
B	°	Breiten in WGS84-Koordinaten
b _S	m	Schnittbreite
b _{SF}	m	Schrägfördererbreite
c	m/s	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
f _A	1/s	Abtastfrequenz
f _T	1/s	Taktfrequenz
l _i	-	Zählimpulse bei der Kornvolumenstrommessung
k _i	-	Konstanten zur Berechnung der Ersatzdunkelzeit T _{DE}
L	°	Längengrad in WGS84-Koordinaten
l _{Ra}	m	Sieblänge der Reinigungsanlage
m	kg	Masse
m _B	kg	Behältermasse der Korndichtemeßeinrichtung
m' _B	kg	erfaßte Behältermasse der Korndichtemeßeinrichtung
m _P	kg	Masse der Probe zur Korndichtemessung
m _R	kg	Referenzmasse der Korndichtemeßeinrichtung
m' _R	kg	erfaßte Referenzmasse der Korndichtemeßeinrichtung
m''	kg/m ²	Ertrag
ṁ	kg/s	Massenstrom
ṁ'	kg/sm	auf die Dreschtrommelbreite bezogener Massenstrom
n _G	1/min	Gebälasedrehzahl
r _i	m	Entfernung zur Position der Vorausberechnung
r _V	m	zur Vorausberechnung abgesuchter Radius
s _F	m	Wegstrecke

s_{OS}	m	Abstand zwischen Mähmesser und Ortungssystem
s_V	m	Entfernung zwischen aktueller und vorausberechneter Position
Δs	m	Wegdifferenz
t	s	Zeit
t_0	s	Zeitpunkt der Gutaufnahme am Schneidwerk
T_1	s	Zeitkonstante
T_A	s	Abtastrate
T_{DE}	%	Ersatzdunkelzeit der Lichtschranken zur Kornvolumenstrommessung
T_{Di}	%	Dunkelzeiten der Lichtschranken zur Kornvolumenstrommessung
T'_{Di}	%	Dunkelzeiten der Lichtschranken zur Kornvolumenstrommessung (fördergeschwindigkeitskompensiert)
T_R	s	Reaktionszeit
T_S	s	Ansprechverzögerung der Stelleinrichtung
T_t	s	Durchlaufzeit = Totzeit
U_F	V	Ausgabespannung der Kornfeuchteeinrichtung
U_K	%	Kornfeuchtegehalt
U_P	V	Ausgabespannung der Korndichteeinrichtung
U_{SB}	V	Ausgabespannung des Ultraschallabstandssensors
V_B	m^3	Volumen des Probenbehälters zur Korndichtemessung
v_{El}	m/s	Kettengeschwindigkeit im Kornelevator
v_F	m/s	Fahrgeschwindigkeit
v'_F	m/s	korrigierte Fahrgeschwindigkeit
Δv_F	m/s	Fahrgeschwindigkeitsdifferenz
V_K	%	Kornverlust
\dot{V}_K	m^3/s	Kornvolumenstrom
v_M	m/s	unkorrigierte Geschwindigkeit der GPS-Mobilstation
v_Q	m/s	Querförderungs geschwindigkeit

v_R	m/s	angebliche Geschwindigkeit der GPS-Referenzstation
v_U	m/s	Dreschtrumelumfangsgeschwindigkeit
x, y	m	Position in kartesischen Koordinaten
Z	kg/sm ²	Kornabscheidung
α	°	Abstrahlwinkel des Radargeschwindigkeitssensors
α_F	°	Neigungswinkel des Kornelevators in Falllinie
α_S	°	Neigungswinkel des Kornelevators in Schichtlinie
γ_M	°	unkorrigierter Richtungswinkel der GPS-Mobilstation
γ_R	°	unkorrigierter Richtungswinkel der GPS-Referenzstation
$\Delta\nu$	1/s	Dopplerfrequenz des Radargeschwindigkeitssensors
η_D	-	Dreschwerkwirkungsgrad
ν_0	1/s	Grundfrequenz des Radargeschwindigkeitssensors
ρ_K	kg/m ³	Korndichte (Schüttdichte)

Indizes und Abkürzungen

O	Anfangswert
ber	berechneter Wert
bez	Bezugswert
Brutto	auf die Bruttomessung bezogener Wert
(D)GPS	(Differential) Global Positioning System
F	auf das Feld bezogener Wert
K	Korn
max	Maximalwert
min	Minimalwert
mittel	mittlerer Wert
nenn	auf die Nenndrehzahl bezogener Wert
NKB	Nichtkornbestandteile
opt	Optimalwert
P_1	auf die vorangegangene Position bezogener Wert
P_2	auf die aktuelle Position bezogener Wert
P_3	auf die vorausberechnete Position bezogener Wert

P _O	auf die Position des Ortungssystems bezogener Wert
P _S	auf die Position der Mähmessermittle bezogener Wert
Q	Querförderung
Radar	Wert der Radargeschwindigkeitssensoren
S	auf den Sensor bezogener Wert
SG	Sommergerste
Tara	auf die Taramessung bezogener Wert
TD	auf die Volumenstrommessung bezogener Wert
UK	auf die Kornfeuchtemessung bezogener Wert
V	vorausberechneter Wert
VKR	auf die Reinigungsverlustmessung bezogener Wert
VKS	auf die Schüttlerverlustmessung bezogener Wert
WW	Winterweizen

Zusammenfassung

Die Getreideernte in den Industrieländern wird heute ausschließlich mit dem Mähdescher durchgeführt. Durch eine gleichzeitige Ertragskartierung werden die Voraussetzungen für eine teilflächenspezifische Feldbewirtschaftung geschaffen.

Aus den geokodierten Ertragsdaten, den Ertragskarten, lassen sich Rückschlüsse über kleinräumige Unterschiede in den Wachstumsbedingungen innerhalb eines Feldes ziehen. Gemeinsam mit weiteren geokodiert erfaßten Flächenmerkmalen, z.B. Bodenbeprobungsergebnissen, können die Ertragskarten zu Handlungsempfehlungen für differenzierte Bewirtschaftungsmaßnahmen umgesetzt werden. Die hieraus resultierende Vermeidung von lokalen Über- und Unterbehandlungen führt im Vergleich zur einheitlichen Feldbewirtschaftung zu einem ökonomischeren und ökologischeren Einsatz der landwirtschaftlichen Betriebsmittel. Neben der Dokumentation von Variabilitäten innerhalb eines Feldes lassen sich die geokodierten Teilflächendaten auch zur Optimierung der Einstellung des Mähdeschers nutzen. Hierzu werden die für die Einstellung benötigten Prozeßgrößen oder Flächenmerkmale einer noch nicht bearbeiteten, vor dem Schneidwerk liegenden Teilfläche aus bereits während des aktuellen Arbeitsgangs erfaßten Teilflächendaten vorausberechnet. Mit diesen vorausberechneten Daten kann die Maschineneinstellung an das Zeitverhalten der Stelleinrichtungen angepaßt durchgeführt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die theoretischen Grundlagen zur Ertragskartierung und ein Verfahren zum Betrieb des Mähdeschers mit geokodierten Teilflächendaten entwickelt und untersucht. Zu deren Realisierung werden Module für die Erfassung, Übertragung, Verarbeitung und Umsetzung geokodierter Teilflächendaten benötigt.

Bei der Ertragskartierung werden die aktuelle Position des Mähdeschers und die den Kornertrag bestimmenden Meßgrößen Kornmassenstrom, Fahrgeschwindigkeit und Schnittbreite kontinuierlich während der Getreideernte erfaßt. Um auch tageszeit- und standortabhängige Variationen im Kornfeuchtegehalt in die Ertragsberechnung einzubeziehen, wird dieser ebenfalls gemessen.

Die experimentelle Untersuchung der verwendeten Meßeinrichtungen erfolgt im Labor mit Versuchsständen und im Feld mit einem Versuchsmähdescher, der

mit Meß- und Datenverarbeitungseinrichtungen zur Kartierung und Vorausberechnung des Kornertrags ausgestattet ist. Die Ergebnisse zeigen eine grundsätzliche Eignung der Meßeinrichtungen unter den meisten Erntebedingungen.

Die Positionsbestimmung über Satellitenortung mit DGPS (Differential Global Positioning System) führt zu Abweichungen unter 2 m von der tatsächlichen Position. Die Korndurchsatzmessung mit einem volumetrischen Lichtschranken-Meßverfahren, das zur Berechnung des Kornmassenstroms mit einer Korndichte- und einer Kornfeuchtegehaltsmeßeinrichtung kombiniert wird, ergibt Abweichungen unter 5 %. Die Geschwindigkeit wird über zwei Radargeschwindigkeitssensoren in Betrag und Richtung mit Abweichungen unter 0,5 % bestimmt. Die Geschwindigkeitsmessung über DGPS führt zu vergleichbaren Ergebnissen. Die Messung des nicht genutzten Abstands zwischen den Schneidwerkskanten und dem stehenden Bestand mittels Ultraschall-Abstandssensoren läßt sich mit Abweichungen unter 0,12 m durchführen.

Da die Meßgrößen Kornmassenstrom und Kornfeuchtegehalt sowie die tendenziell bestimmten Kornverluste nicht direkt zum Zeitpunkt der Gutaufnahme am Schneidwerk bestimmt werden können, werden die experimentell bestimmten Durchlaufzeiten für den Guttransport in der Datenzuordnung berücksichtigt. Sie liegen beim Versuchsmähdrescher abhängig vom Einbauort der Meßeinrichtungen und dem Gesamtmassendurchsatz zwischen 9 und 17 s.

Da bestimmte Erntebedingungen zu höheren Meßabweichungen und veränderten Durchlaufzeiten führen, wird vor der Ertragskartierung eine Datenkontrolle durchgeführt. Die Meßgrößen werden sowohl einzeln als auch in Beziehung zueinander verschiedenen Plausibilitätskontrollen unterzogen. Hierdurch werden die tatsächlich im Feld vorliegenden Ertragsverhältnisse genauer wiedergegeben.

Der Ablauf von der Erfassung der Meßgrößen bis zur Erstellung von Ertragskarten und deren graphische Darstellung wird exemplarisch anhand eines Feldes verdeutlicht. Für dasselbe Feld wird auch eine Vorausberechnung des Kornertrags mit verschiedenen Berechnungsverfahren durchgeführt. Ein Vergleich zwischen der gemessenen und der vorausberechneten Ertragskarte zeigt eine gute Übereinstimmung in Bezug auf die Ertragsverteilung und die Lage der Isoertragsflächen. Dies bestätigt die Anwendbarkeit des Verfahrens auf eine 'vorausschauende' Maschineneinstellung.

1 Einleitung

Die zunehmende Verschärfung der ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen für die Agrarwirtschaft erfordert eine weitergehende Optimierung der Produktionsverfahren bei der Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzflächen. Die diesbezügliche Entwicklung in der Landtechnik ist unter anderem durch eine vermehrte Verwendung von elektronischen Baugruppen auf den mobilen Landmaschinen gekennzeichnet. Anfänglich beschränkte sich deren Einsatz nur auf Überwachungs- und Informationsaufgaben. Inzwischen werden bereits einzelne Teilprozesse durch elektronische Steuerungs- und Regelungseinrichtungen automatisiert durchgeführt. Mit der Einführung der Bordcomputer hat auch die Datenverarbeitung Einzug in die Ackerschlepper und selbstfahrenden Landmaschinen gehalten. Die aktuellen Betriebszustände der Maschinen und Geräte lassen sich über verschiedene Sensoren erfassen und durch die hohe Verarbeitungsleistung der Mikroprozessoren mittels geeigneter Software zu komplexen Steuerungsfunktionen verarbeiten. Durch einen Datentransfer zwischen mobilen Bordcomputern und dem Betriebscomputer ist die Anbindung an das Betriebsmanagement möglich geworden. Während der Feldarbeit aufgezeichnete Daten können bereits in Ackerschlagkarteien zur Verwaltung einzelner Felder auf dem PC verarbeitet werden.

Besonders beim Mähdrescher, in dem die Funktionen Mähen, Fördern, Dreschen, Trennen, Reinigen und Sammeln zusammengefaßt sind, lassen sich zur Entlastung der Bedienperson, Steigerung der Kapazitätsauslastung und Verbesserung der Arbeitsqualität eine Vielzahl von Aufgaben durch elektronische Meß-, Steuerungs- und Regelungseinrichtungen optimieren.

Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau eines konventionellen Mähdreschers mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler. Im Schneidwerk wird das Erntegut mit Hilfe der Haspel dem Messerbalken zugeführt und nach dem Schnitt an die Einzugsschnecke weitergeleitet. Hier wird es auf die Breite der nachfolgenden Arbeitselemente zusammengefaßt und an den Schrägförderer übergeben. Dieser transportiert das Gut zu dem aus Dreschtrommel und Dreschkorb bestehenden

Dreschwerk, in dem der Ausdrusch von Körnern oder Samen durch eine Kombination aus Schlag- und Reibungsbeanspruchung erfolgt.

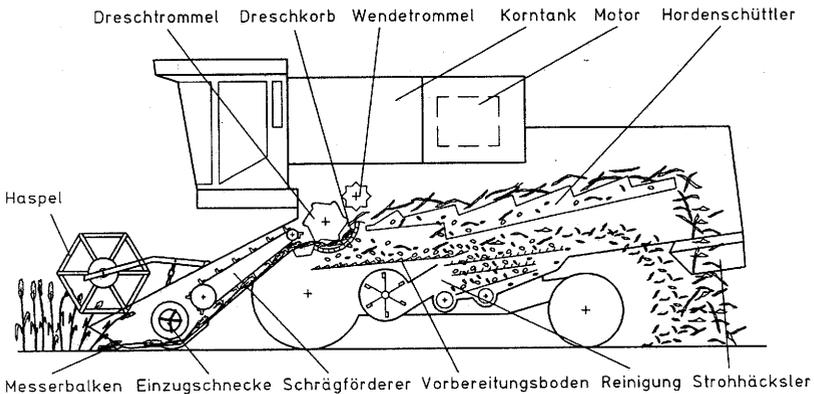


Bild 1: Konventioneller Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler

Der überwiegende Teil der Körner gelangt durch den Dreschkorb gemeinsam mit Spreu und Kurzstrohteilen auf den Vorbereitungsboden, der das Gutgemisch durch eine Schwingbewegung auflockert und auf die Siebe der Reinigungsanlage fördert. Die Schwingsiebe der Reinigungsanlage werden vom Luftstrom eines Gebläses durchströmt, wobei die Körner durch die Siebe hindurchtreten und über die Kornquerförderschnecke, den Kornelevator und die Korntankbefüllschnecke in den Korntank geleitet werden. Spreu und Kurzstroh werden über das Siebende hinaus auf das Feld gefördert. Schwere Bestandteile, wie ungedroschene Ähren (Überkehr), werden an der Verlängerung des Obersiebes abgeschieden und gemeinsam mit dem Übergang des Untersiebes nochmals einem Dreschvorgang unterzogen. Die beim Verlassen des Dreschwerks nicht abgeschiedenen Körner und der Hauptanteil der Nichtkornbestandteile (NKB) werden von der Wendetrommel auf den Schüttler geleitet und von diesem in einer Wurf-förderung zum Ausgang des Mähdreschers transportiert. In der Strohschicht verbliebene Körner werden während der Förderung zusammen mit Kurzstroh abgetrennt und über Rücklaufeinrichtungen ebenfalls dem Vorbereitungsboden zugeführt. Bei Bedarf kann das Stroh vor der Ablage auf dem Feld mit einem Strohhäcksler zerkleinert werden.

Außer dem beschriebenen konventionellen Mähdröschler werden verschiedene Bauarten mit erweiterten und alternativen Dresch- und Trennsystemen angeboten [1].

Zur optimalen Kapazitätsauslastung muß die Bedienung des Mähdröschlers und die Einstellung der Arbeitselemente bei allen Bauarten an die gegebenen Erntebedingungen und die variierenden Stoffeigenschaften des Erntegutes angepaßt werden. Mit dem Ziel den Gesamtprozeß des Mähdröschlers zu automatisieren, werden bereits wichtige Teilprozesse durch den Einsatz von Informations- und Regelungseinrichtungen am Mähdröschler automatisch durchgeführt, **Bild 2**.

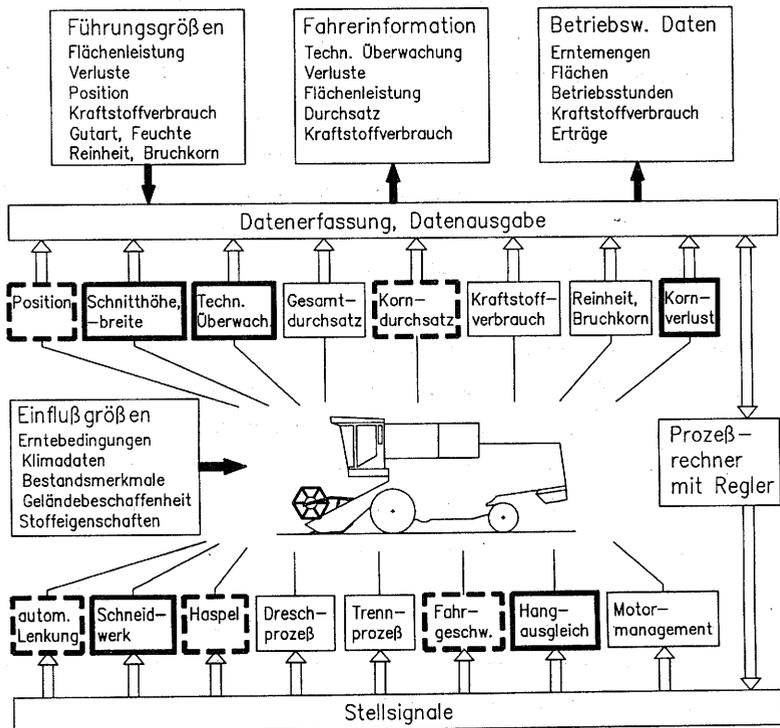


Bild 2: Informations- und Regelungseinrichtungen am Mähdröschler nach [2] (stark umrandet: Stand 1996)

Die Einbindung eines Positionsbestimmungssystems eröffnet neue Möglichkeiten für die Automatisierung des Mähdrusches und die Bereitstellung betriebswirtschaftlicher Daten. Zwar ist eine automatische Führung der Maschine aufgrund des Fehlens eines zuverlässigen Ortungssignals für Positionsbestimmungen mit Abweichungen im Zentimeterbereich noch nicht realisierbar. Die Genauigkeit der verfügbaren Systeme ermöglicht jedoch bereits eine teilflächenbezogene Erfassung von Prozeßdaten, aus denen sich Informationen über Variabilitäten innerhalb eines Feldes herleiten lassen.

Die Ertragskartierung bildet einen wichtigen Baustein der Datenerfassung für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Bei diesem Bewirtschaftungsverfahren wird berücksichtigt, daß die Wachstumsbedingungen innerhalb der meisten Felder infolge von örtlichen Variabilitäten der Bodenart oder der Verfügbarkeit von Nährstoffen und Wasser nicht homogen sind. Gemäß der ermittelten Variabilitäten wird das Feld in Teilflächen unterteilt, die ihrem spezifischen Bedarf entsprechend unterschiedlich bewirtschaftet werden. Die hiermit verbundene Vermeidung von lokalen Über- und Unterbehandlungen einzelner Teilflächen führt im Vergleich zur einheitlichen Bewirtschaftung zu einem wirtschaftlicheren und auch umweltschonenderen Einsatz der landwirtschaftlichen Betriebsmittel. Erreichen läßt sich diese Zielsetzung durch den kombinierten Einsatz von elektronischen Meß-, Steuerungs- und Regelungseinrichtungen und moderner Datenverarbeitung, weshalb das Verfahren auch als 'Computer Aided Farming' bezeichnet wird. Andere gebräuchliche Bezeichnungen sind 'Site-Specific Farming', 'Spatially-Variable Control', 'Precision Farming' oder 'Prescription Farming'.

Der Daten- und Informationsfluß bei der teilflächenspezifischen Feldbewirtschaftung ist in **Bild 3** am Beispiel der Ertragskartierung und deren Verarbeitung zu Handlungsanweisungen schematisch dargestellt.

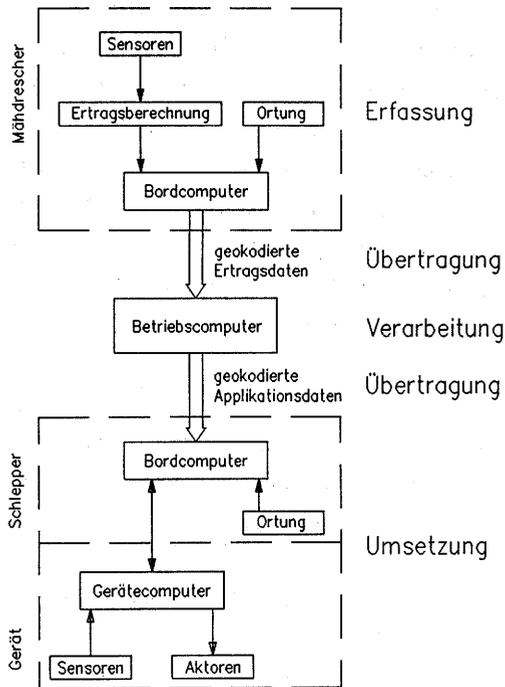


Bild 3: Daten- und Informationsfluß bei der teilflächenspezifischen Feldbewirtschaftung

Die Erfassung von geokodierten Daten erfordert die gleichzeitige Bestimmung der örtlich variablen Meßgrößen und der Position. Zur automatischen Ertragskartierung während der Getreideernte wird der Mähdrescher dazu mit einem Ortungssystem und einer Ertragsmeßeinrichtung ausgerüstet. Die Verknüpfung und Speicherung der Daten übernimmt ein Bordcomputer. Für die kontinuierliche Bestimmung des Kornertrags m_K'' werden Sensoren zur Erfassung des Kornmassenstroms \dot{m}_K und der Flächenleistung \dot{A} benötigt. Die Flächenleistung des Mähdreschers ergibt sich aus dem Produkt von Fahrgeschwindigkeit v_F und Schnittbreite b_S , wobei als Schnittbreite nur die tatsächlich genutzte Arbeitsbreite des Schneidwerks bezeichnet wird. Durch die zusätzliche Messung des aktuellen Kornfeuchtegehalts U_K , der sich in Abhängigkeit von Erntezeitpunkt und Standort ändern kann, ist es möglich, den Kornertrag auf einen einheitlichen Feuchtegehalt U_{Kbez} (z.B. Lagerfeuchtegehalt, Trockenmasse) zu beziehen.

Bei der Berechnung des Kornertrags und der Verknüpfung von Ertrags- und Positionsdaten zur Ertragskarte muß beachtet werden, daß der Kornmassenstrom erst zeitversetzt zum Zeitpunkt, an dem das Gut vom Mähdrescherschneidwerk aufgenommen wird, erfaßt wird. Außerdem wird der Gutstrom in den Förder-, Dresch- und Trennelementen in verschiedene Teilströme verzweigt, die die Maschine auf unterschiedlichen Wegen durchlaufen. Zur Berechnung des Kornertrags, wie er auf dem Feld vorgelegen hat, müssen sich die Meßgrößen deshalb einheitlich auf den Zeitpunkt der Gutaufnahme beziehen. Hierzu werden Modelle benötigt, die das dynamische Verhalten des Guttransports im Mähdrescher beschreiben.

Zur Datenübertragung zwischen dem mobilen Bordcomputer und dem Betriebscomputer, auf dem die Weiterverarbeitung der Ertragsdaten erfolgt, werden vorwiegend Chipkarten und RAM-Boxen eingesetzt. Protokolle zur Übertragung teilflächenspezifischer Daten wurden bereits in der Normung des landwirtschaftlichen BUS-Systems LBS (DIN 9684, Teil 5) berücksichtigt [3].

Die Verarbeitung der geokodierten Ertragsdaten erfolgt mit Programmen, die auf Basis von geographischen Informationssystemen (GIS) entwickelt wurden [4]. Neben den Ertragsdaten lassen sich auch andere geokodierte Daten, wie z.B. Bodenbeprobungsergebnisse, einlesen und mit geostatistischen Verfahren zu Karten aufbereiten. Als Karte soll in diesem Zusammenhang nicht die visuelle Darstellung, sondern die Datei von positionsbezogenen Merkmalen verstanden werden. Durch die mathematische Verknüpfung der verschiedenen Karten können aufbauend auf pflanzenbauliche und bodenkundliche Grundlagen Dateien mit teilflächenspezifischen Handlungsanweisungen, wie z.B. Düngeempfehlungen, für die anschließende Bewirtschaftung erzeugt werden. Eine so entstandene Datenbank läßt sich durch die regelmäßige Eingabe von aktuellen positionsbezogenen Daten, durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen und die Einbeziehung von Witterungsdaten ständig erweitern. Hierdurch wird die Genauigkeit bei der Erstellung von Handlungsempfehlungen gesteigert.

Zur Umsetzung werden die geokodierten Applikationsmaßnahmen in den Bordcomputer des Schleppers oder der landwirtschaftlichen Arbeitsmaschine eingelesen. Dieser ist mit einem Ortungssystem und dem Gerätecomputer zur Maschineneinstellung verbunden. Beim Überschreiten einer für die Feldbearbeitung vorgegebenen Teilflächengrenze wird die Maschineneinstellung an die für die Teilfläche festgelegte Vorgabe angepaßt.

Die im Bild 3 dargestellten Systemgrenzen sind nicht bindend. So können die Sensoren und Aktoren auf den Geräten und Arbeitsmaschinen direkt mit dem Bordcomputer verbunden sein. Bei ausreichender Rechenleistung kann auch die Datenverarbeitung teilweise oder vollständig vom Bordcomputer übernommen werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erarbeitung von Grundlagen zur Ertragskartierung während der Getreideernte mit dem Mähdrescher, um Basisdaten für die teilflächenspezifische Feldbewirtschaftung bereitzustellen und den Gesamtprozeß der Getreideernte zu optimieren.

Aufbauend auf einer analytischen Betrachtung der Förder-, Dresch- und Trennvorgänge im Mähdrescher werden Verfahren zur Erfassung und Kartierung von geokodierten Ertragsdaten entwickelt und untersucht, die den speziellen Anforderungen des Mähdreschereinsatzes entsprechen. Die Ergebnisse der Untersuchungen stellen die Möglichkeiten neuer Meßverfahren dar und zeigen Verbesserungsmöglichkeiten an bereits bekannten Meßverfahren auf.

Zur Optimierung des Betriebsverhaltens der Regelungseinrichtungen am Mähdrescher wird ein Verfahren entwickelt, das die Umsetzung von aktuellen geokodierten Ertragsdaten direkt während des Mähdrusches ermöglicht. Dies erfolgt durch die Vorausberechnung des Ertrags von noch nicht abgeernteten Teilflächen. Durch eine genaue Ertragsbestimmung, die bereits vor der Aufnahme des Ernteguts am Schneidwerk stattfindet, lassen sich die Einstellung der Fahrgeschwindigkeit und der Arbeitsorgane des Mähdreschers ohne Totzeit an Ertragsänderungen anpassen.

2 Stand der Forschung

2.1 Meßverfahren zur Ertragskartierung

2.1.1 Positionsbestimmung

Die zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge untersuchten Systeme lassen sich in Koppel-, Laser- und Funkortungssysteme unterteilen.

Koppelortungssysteme bestimmen die relative Positionsänderung des Fahrzeugs aus Betrag und Richtung des Fahrwegs, die mit fahrzeugfesten Sensoren gemessen werden, **Bild 4**. Der Einsatz dieser Systeme erfordert zu Beginn der Messung eine genaue Bestimmung von Startposition und -richtung. Da sich Abweichungen in den Positionsberechnungen über der Meßdauer aufsummieren, sind auch während des Arbeitsablaufs Positionsabgleiche notwendig, deren Intervall durch die Genauigkeit des Systems bestimmt wird.

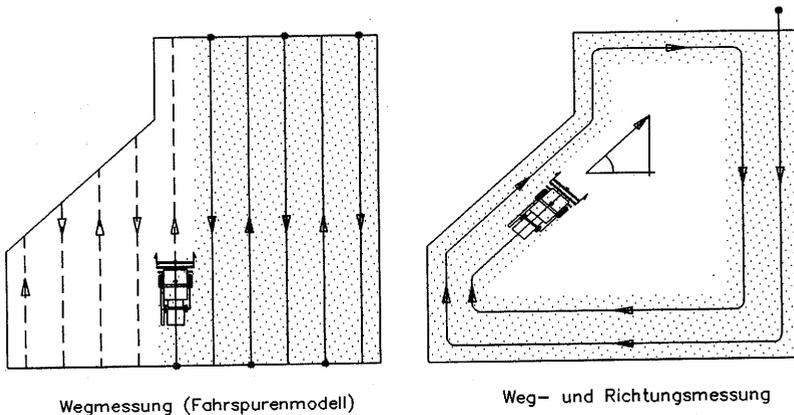


Bild 4: Koppelortungssysteme

Ein einfaches, bereits in der Landwirtschaft eingesetztes Koppelortungsverfahren ist die Positionsbestimmung entlang von festgelegten Fahrspuren. Durch die Vorgabe des Fahrkurses werden lediglich Sensoren zur Weg- bzw. Geschwindigkeitsmessung benötigt.

Schumacher u. Froehlich [5] beschrieben ein Ortungssystem zur Applikation von Düngemitteln, bei dem die Position aus dem in der Fahrgasse zurückgelegten Weg bestimmt wird. Die Anwendung des Fahrgassenmodells verlangt das genaue Einhalten des vorgegebenen Arbeitsablaufs und kann bei Feldarbeiten mit geringeren Arbeitsbreiten, wie dem Mähdrusch, nicht angewendet werden. In Untersuchungen zur Ertragskartierung von Vansichen u. De Baerdemaeker [6] und Stafford u.a [7] wurde die Position des Mähdrescher durch die Wegmessung entlang der parallel zueinander verlaufenden und durchnummerierten Fahrspuren bestimmt. Die Anfangs- und Endpunkte der Fahrspuren bzw. die Abstände zwischen den Fahrspuren wurden manuell bestimmt.

Koppelortungssysteme, bei denen die Fahrtrichtung durch fahrzeugeigene Sensoren erfaßt wird, sind nicht an einen vorgegebenen Fahrkurs gebunden. Die landwirtschaftliche Nutzung einfacher, bereits im Straßenverkehr eingesetzter Systeme, welche die Fahrtrichtung mit einem elektromagnetischen Kompaß, einem Trägheitssensor, einem Lenkwinkelgeber oder durch links- und rechtsseitige Messung der Fahrgeschwindigkeit bestimmen, wurden von Beuche u. Hellebrand [8,9], Muhr u. Auernhammer [10] und Reitz u. Kutzbach [11,12] untersucht. Die Untersuchungen zeigten, daß im landwirtschaftlichen Einsatz unterschiedliche Störgrößen auf die Sensoren wirken, so daß diese Systeme nicht zur eigenständigen Ortung genutzt werden können. Die geringsten Abweichungen im Bereich der Koppelortungssysteme werden mit inertialen Sensoren erreicht, deren Entwicklung von den mechanischen Kreisel hin zu optischen Systemen geht. Ansätze für den Einsatz der Trägheitsnavigation in der Landwirtschaft wurden in [13] und [14] vorgestellt.

Bei den Laser- und Funkortungssystemen werden zur Positionsbestimmung Winkelmessungen (Triangulation) oder Streckenmessungen (Trilateration) zu bekannten Positionen sowie daraus kombinierte Verfahren angewendet, **Bild 5**. Die Signalübertragung erfolgt entweder im Einwegebetrieb, wobei die Positionen der Sendeanlagen bekannt sind und ein Empfänger auf dem zu ortenden Fahrzeug montiert ist, oder mit einer mobilen Sende-/Empfangsanlage und stationären Reflexionseinrichtungen im Mehrwegebetrieb. Voraussetzung ist bei allen

Verfahren eine störungsfreie Signalausbreitung. Abschattungen der Signale an Hindernissen führen zu Systemausfällen, Reflexionen führen zu Multipath-Effekten und somit zu Ortungsfehlern.

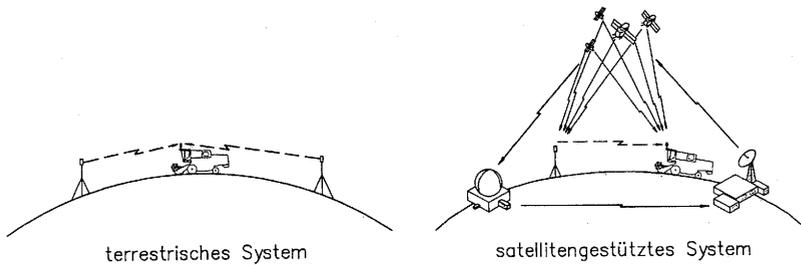


Bild 5: Laser- und Funkortungssysteme

Terrestrische Ortungssysteme arbeiten mit Sende- und Empfangseinheiten, die sich auf der Erdoberfläche befinden. Ihre Anwendung wird deshalb durch die Reichweite der Signalübertragung und durch die Geländeform auf Kurzstrecken beschränkt. Außerdem arbeiten sie in der Regel zweidimensional, so daß zur Bestimmung der dritten Dimension mehrere Verfahren miteinander gekoppelt werden müssen [15]. Der landwirtschaftliche Einsatz von Laserortungssystemen wurde von Gordon u. Holmes [16], Smulevich u.a. [17] und Holmquist [18] beschrieben. Monod [19], Schueller u. Bae [20] und Palmer [21] setzten Mikrowellen-Funkortungssysteme ein. Wagner u. Schrock [22] nutzten das LORAN-C (Long Range Navigation System) zur Ortung landwirtschaftlicher Maschinen. Da dieses System in der Luft- und Schifffahrt eingesetzt wird und somit über ein überregionales Netz von Sendeanlagen verfügt, werden zur Nutzung lediglich Empfangseinheiten benötigt.

Bei den satellitengestützten Funkortungssystemen befinden sich die Sendeeinheiten an bekannten Positionen im All, wodurch eine gute 'Sichtverbindung' zu den Empfangsantennen erreicht wird. Zur Überwachung und Übertragung der Satellitenbahndaten stehen die Satelliten mit Bodenstationen in Verbindung. Die verbreitetsten Systeme sind das NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging - Global Positioning System) der USA sowie das GLONASS (Global Navigation Satellite System) der ehemaligen Sowjetunion [23,24].

Untersuchungen zum landwirtschaftlichen Einsatz der Satellitenortung wurden mit dem NAVSTAR-GPS, das im folgenden als GPS bezeichnet wird, durchgeführt. Dieses System wurde zur witterungsunabhängigen dreidimensionalen Positionsbestimmung in einem weltweiten Referenzsystem primär für militärische Anwendungen entwickelt. Von Seiten der Betreiber wurde mitgeteilt, die Nutzung mindestens bis zum Jahr 2003 auch zivilen Anwendern kostenfrei anzubieten, wobei die Genauigkeit jedoch durch ein aufgeschaltetes wechselndes Fehlersignal herabgesetzt wird [25]. Durch die differentielle GPS-Anwendung (DGPS) lassen sich die Fehler weitgehend eliminieren, indem in einer stationären GPS-Referenzstation, deren Position bekannt ist, Korrekturdaten berechnet werden, die für alle in der näheren Umgebung arbeitenden GPS-Empfänger gelten. Verschiedene DGPS-Verfahren sind in [26] beschrieben. Eingehende Beschreibungen des Einsatzes der Satellitenortung und -navigation in der Landwirtschaft geben Jahns u. Kögl [27] sowie Auernhammer [28].

Durch Hybridortungssysteme, bei denen das DGPS in Kombination mit anderen Ortungssystemen oder elektronisch gespeicherten Karten arbeitet, lassen sich die berechneten Koordinaten auf Plausibilität prüfen und Zeiten ohne korrekte DGPS-Positionsrechnung überbrücken, wie sie z.B. bei Abschattungen der Satellitensignale auftreten [29 bis 33]. Die landtechnischen Untersuchungen von hybriden Ortungssystemen beschränkten sich aus Kostengründen bisher auf einfach aufgebaute Koppelortungssysteme [8 bis 12]. Hochwertige Hybridsysteme mit inertialen Sensoren werden bereits zur durchgehenden Positionsbestimmung von Kraftfahrzeugen, z.B. in stark bebauten Gebieten, erfolgreich eingesetzt. Bei einem verbreiteten Einsatz solcher Systeme im Verkehrsbereich ist mit einer Verminderung der Anschaffungskosten zu rechnen, so daß hochwertige Hybridsysteme zukünftig auch im landwirtschaftlichen Bereich wirtschaftlich sinnvoll eingesetzt werden können.

2.1.2 Durchsatzmessung

Untersuchungen zur Durchsatzmessung wurden bereits seit den 60er Jahren durchgeführt. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten lag vorwiegend auf der Entwicklung von Meßverfahren zur Bestimmung des NKB-Durchsatzes, der die Leistungsfähigkeit des Mähdreschers hauptsächlich beeinflusst. Es wurden Meßeinrichtungen entwickelt, mit denen der Erntegutdurchsatz indirekt aus der Belastung des Dreschwerkes oder der ihm vorgeschalteten Schneid- und Förderorgane bestimmt wird [34 bis 39].

Untersuchungen von Eimer [34], in denen die Zusammenhänge zwischen dem Erntegutdurchsatz und den Antriebsmomenten von Mähmesser, Schrägförderer und Dreschtrommel, sowie den Auslenkungen von Einzugsschnecke, vorderer Umlenkwalze des Schrägförderers und Schrägfördererkette ermittelt wurden, zeigen einen erheblichen Einfluß der Gutart auf die Meßergebnisse. Klassen u.a. [40] untersuchten plattenförmige kapazitive Meßeinrichtungen, bei denen die NKB als Dielektrikum wirken, zur berührungslosen Bestimmung des NKB-Durchsatzes im Schneidwerk. Da bei allen genannten Meßverfahren Änderungen der Stoffeigenschaften des Ernteguts als Störgrößen auf die Meßeinrichtungen wirken, ist eine genaue Bestimmung des absoluten Erntegutdurchsatzes nicht möglich.

Zusammenstellungen von Meßverfahren zur Bestimmung des Korndurchsatzes sind bei De Baerdemaeker u.a. [41], Kutzbach [42] und Borgelt u. Sudduth [43] zu finden. Gravimetrische Verfahren zur direkten Massenbestimmung, **Bild 6**, wie sie in stationären Anlagen der schüttgutverarbeitenden Industrie bekannt sind, werden beim Betrieb des Mähdreschers durch die auftretenden Schwingungen und Neigungen erheblich gestört. Eine Wägung des gesamten Korntankinhaltes erfordert zudem die Entkoppelung des Korntanks vom Mähdrescherumpf und ein Wägesystem mit großem Meßbereich und hoher Auflösung. Durchlaufwaagen, deren Einsatz bereits für Absackeinrichtungen von Dreschmaschinen beschrieben wurde [44], unterbrechen den Kornstrom funktionsbedingt, wodurch es zu Störungen in der Förderung kommen kann.

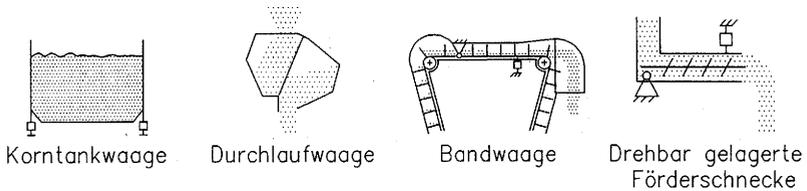


Bild 6: Gravimetrische Meßverfahren zur Bestimmung des Korndurchsatzes nach [42,45]

Eine kontinuierlich arbeitende Korndurchsatzmeßeinrichtung nach dem Prinzip einer Bandwaage, für deren Einbau im Mähdrescher der Kornelevator dreiecksförmig gestaltet ist, wurde von Howard u.a. [45] und Pringle u.a. [46] untersucht. Der Kornstrom wird im oberen, horizontal ausgerichteten Fördertrum über eine Wägeeinrichtung geleitet und der Durchsatz aus dem Produkt der ermittelten Streckenlast und der Fördergeschwindigkeit berechnet. Insbesondere wurden Probleme bei der Abdichtung und Ausrichtung der Wägeeinrichtung beschrieben. Um den Einfluß der Gutart und des Feuchtegehalts zu berücksichtigen, wurde ein erweitertes Berechnungsmodell, in das zusätzlich die Kornschüttdichte einbezogen wird, entwickelt.

Wagner u. Schrock [47,48] ermittelten den Korndurchsatz mit einer unterhalb der serienmäßigen Korntankbefüllschnecke montierten, drehbar gelagerten Förderschnecke, deren freies Ende an einer Kraftmeßdose aufgehängt wurde. Der Durchsatz wurde aus dem Produkt des Meßsignals und der Schneckendrehzahl bestimmt. Durch den Einbau der zusätzlichen Förderschnecke wird ein erheblicher Teil des Korntankvolumens belegt. Außerdem muß bei diesem Meßverfahren gewährleistet werden, daß sich die Schnecke nicht an dem bereits in den Korntank geförderten Gut abstützt.

Konstruktiv und meßtechnisch einfacher zu verwirklichen sind Verfahren, die den Kornmassenstrom über eine Volumenmessung ermitteln, **Bild 7**. Dazu ist jedoch eine regelmäßige Bestimmung der Dichte des Ernteguts notwendig, die nicht nur von der Gutart und dem Feuchtegehalt abhängt, sondern sich auch innerhalb des Tagesverlaufs und in Abhängigkeit vom Standort ändert [49].



Bild 7: Volumetrische Meßverfahren zur Bestimmung des Korndurchsatzes nach [42]

Im Korntank angebrachte Ultraschallsensoren oder Photodioden werden zur Füllstandsanzeige genutzt. Eine genaue Durchsatzmessung ist hiermit jedoch nicht möglich, da sich die Verteilung des Guts im Korntank durch Schwingungen, Hangneigungen und Guteigenschaften (z.B. Böschungswinkel, Schüttdichte) fortlaufend ändert.

Die volumetrische Korndurchsatzmessung mit Hilfe eines Zellenrades wurde bereits mehrfach untersucht [50 bis 54]. Das Gerät wird bei den meisten Mähdreschern auf den Kornelevator aufgesetzt. Als durchsatzabhängiges Meßsignal werden die Umdrehungen, die zur Förderung des Körnerstroms notwendig sind, gezählt. Um zu gewährleisten, daß die Zellen immer vollständig gefüllt sind, wird der Antrieb unterbrochen, wenn an einem oberhalb des Zellenrades angebrachten Füllstandssensor kein Gut anliegt. Die Einstellung des Füllstandssensors muß dazu korrekt auf die Stoffeigenschaften des Ernteguts abgestimmt werden.

Diekhans [39] stellte ein berührungsloses Meßverfahren vor, das mit einer im oberen Teil des Kornelevators angebrachten Lichtschranke die Höhe der Beladung auf den Förderpaddeln bestimmt. Der Lichtstrahl verläuft quer zur Fahrtrichtung des Mähdreschers durch den Elevatorschacht und wird durch die Paddeln und das darauf geförderte Gut unterbrochen. Aus dem Verhältnis der gemessenen Hell- und Dunkelzeiten, kombiniert mit der theoretischen Förderleistung, läßt sich das geförderte Gutvolumen bestimmen. Die Messungen werden jedoch durch Verlagerungen des Guts auf den Paddeln, die z.B. beim Hangeinsatz des Mähdreschers oder durch Änderungen der Stoffeigenschaften hervorgerufen werden, beeinflußt.

Pfeiffer u.a. [55] erweiterten dieses Meßverfahren, indem sie eine Lichtquelle und vier gegenüberliegende Photodioden im Elevator anbrachten, um so das Profil der Gutschicht auf den einzelnen Paddeln genauer zu bestimmen. Die Untersuchungen ergaben, daß der arithmetische Mittelwert der vier Lichtschranken-signale am besten mit dem Durchsatz korreliert. Es wurde jedoch ein stören-der Einfluß des Feuchtegehalts auf die Meßergebnisse festgestellt.

Für eine bereits in der Praxis eingesetzte Korndurchsatzmeßeinrichtung, die ebenfalls auf dem in [39] beschriebenen Lichtschranken-Meßverfahren basiert, wird zur Verminderung der Abweichungen beim Hangeinsatz ein Sensor, der die Neigung des Mähdreschers in Schichtlinie ermittelt, angeboten [56]. Da die Verteilung des Guts auf den Paddeln hiermit nicht direkt erfaßt wird, bleibt der Einfluß anderer Störgrößen unkompensiert.

Heidemann u. Stolpe [57] beschrieben ein Meßverfahren, bei dem der Kornstrom durch eine mit Lichtschranken versehene Blendenöffnung am Ausgang der Korn-tankschnecke geleitet wird. Als Maß für den Durchsatz wird die vom Kornstrom ausgefüllte Fläche der Austrittsöffnung bestimmt. Auch dieses Meßverfahren wird durch die Gutart und die Stoffeigenschaften sowie die Hangneigung beein-flußt. Für den praktische Einsatz muß außerdem konstruktiv verhindert werden, daß sich das Gut in der Austrittsöffnung aufstaut, wie es z.B. in der Endphase der Korntankbefüllung der Fall ist.

Impulsmeßverfahren bestimmen den Kornmassenstrom über die Messung der Reaktionskräfte, die beim Auftreffen oder Umlenken des Kornstroms an den Meßeinrichtungen entstehen, **Bild 8**.



Bild 8: Impulsmeßverfahren zur Bestimmung des Korndurchsatzes nach [42]

Meßeinrichtungen in Form von Prallplatten oder Trichtern wurden ursprünglich zur Ermittlung der geernteten Korngesamtmasse eingesetzt und dazu unter dem Auslauf der Korntankentleerungsschnecke angebracht. Da die gemessenen Reaktionskräfte nach den Gesetzen vom elastischen Stoß entscheidend vom Stoßfaktor abhängen, beeinflussen die Stoffeigenschaften des Guts das Meßergebnis. Außerdem sind konstante Auftreffwinkel und -geschwindigkeiten bei der Gutaufgabe Voraussetzungen für die Anwendung dieser Meßverfahren. Untersuchungen von Hooper u. Ambler [58] zeigten dementsprechend einen erheblichen Einfluß der Hangneigung auf die Meßergebnisse. Auernhammer [59] geht davon aus, daß sich die hieraus ergebenden Abweichungen bei der trichterförmigen Meßeinrichtung gegenüber der Prallplatte auf die Hälfte reduzieren lassen, da der Trichter mit zwei Kraftaufnehmern ausgestattet ist.

Zur kontinuierlichen Korndurchsatzmessung konnten sich im praktischen Einsatz jedoch die preiswerteren Meßsysteme auf Basis von Prallplatten durchsetzen. Sie werden im Kopf des Körnerelevators angebracht, wo der Kornstrom in einer Wurfförderung von den Elevatorpaddeln an die Korntankbefüllschnecke geleitet wird. Lediglich für Ertragskartierungsvorversuche montierten Schueller u.a. [60] eine trichterförmige Meßeinrichtung unter die Korntankbefüllschnecke, wobei neben den bereits genannten Störgrößeneinflüssen auch eine erhebliche Verringerung des nutzbaren Korntankvolumens hingenommen werden mußte.

Bei der von Vansichen u. De Baerdemaeker [6] verwendeten Meßeinrichtung wird der Kornstrom am Ausgang des Kornelevators durch einem Krümmer geleitet. Die gemessene Reaktionskraft bzw. das Reaktionsmoment auf den Krümmer wird durch die beim Umlenken entstehende Impulsänderung hervorgerufen und ist bei gleichbleibender Fördergeschwindigkeit am Eingang und Ausgang des Krümmers proportional zum Korndurchsatz. Über reibungsabhängige Änderungen der Fördergeschwindigkeit wirken sich aber auch bei diesem Verfahren die Stoffeigenschaften des Guts auf das Meßergebnis aus. Strubbe u.a. [61] gelang es nach einer Analyse der Förderverhältnisse in der Meßeinrichtung, den Reibungseinfluß durch die Bestimmung eines geeigneten Kraftangriffspunktes zu kompensieren.

In **Bild 9** sind weitere Meßverfahren dargestellt, bei denen der Korndurchsatz indirekt über eine mit ihm korrelierende Größe bestimmt wird.

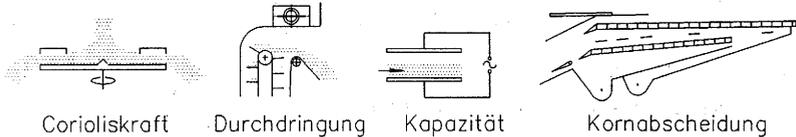


Bild 9: Indirekte Meßverfahren zur Bestimmung des Korndurchsatzes nach [42,62]

In stationären Förderanlagen wird der Massendurchsatz auch durch Messung der Corioliskraft bestimmt [63,64]. Das Gut wird einer mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotierenden Scheibe über eine kegelförmige Umlenkeinrichtung zentral zugeführt und entlang von Leitschaufeln nach außen befördert. Als durchsatzabhängiges Meßsignal wird das Moment aus der hierbei entstehenden Corioliskraft bestimmt. Da die Corioliskraft jedoch durch die Reibung zwischen dem Gut und den Leitschaufeln beeinflusst wird, wirken sich auch bei diesem Meßverfahren die Stoffeigenschaften im Meßergebnis aus. Der Einsatz auf dem Mähdrescher wird zudem dadurch erschwert, daß eine vertikale Fallstrecke über dem Zulauf erforderlich ist.

Bereits im praktischen Mähdreschereinsatz wird ein berührungsloses Meßverfahren verwendet, das den Kornmassendurchsatz aus der Intensitätsabschwächung von radioaktiven Strahlen beim Durchdringen des vorbeifließenden Kornstroms bestimmt [7,52,53]. Hierzu wird die Strahlungsintensität in elektrische Zählimpulse umgewandelt [65]. Einbauort von Strahlenquelle und -detektor ist der Übergang vom Kornelevator auf die Korntankbefüllschnecke. Die Untersuchungen von Auernhammer u. Demmel [52,53] zeigten, daß Kalibrierungen während des Tages durch wechselnde Kornfeuchtegehalte und andere Einflüsse unverzichtbar sind. Durch die Verwendung einer radioaktiven Strahlenquelle (Americium-24-1) ist der Einsatz dieses Meßverfahrens in einigen Ländern untersagt oder unterliegt gesetzlichen Sicherheitsvorschriften.

Kapazitive Verfahren zur Korndurchsatzmessung auf dem Mähdrescher wurden von Stafford [7] und Yang [66] vorgestellt. Als Maß für den Durchsatz wird die Kapazitätsänderung eines vom Kornstrom durchflossenen Meßkondensators bestimmt, die von dem im elektrischen Feld als Dielektrikum wirkenden Kornstrom abhängt. Nach einer Kalibrierung auf die Gutart sollen Einflüsse durch Änderungen von Temperatur, Feuchtegehalt und Fördergeschwindigkeit durch deren parallele Messung kompensiert werden.

Die früheste Möglichkeit, den Korndurchsatz im Mähdrescher zu bestimmen, bietet die Erfassung der an der Reinigungsanlage abgeschiedenen Körner. Hierzu registrieren unter den Sieben angebrachte Prallplattensensoren die Anzahl der auftreffenden Körner. Aus den Signalen der über der Sieblänge verteilten Sensoren lassen sich die lokalen Kornabscheidungen bestimmen und hieraus die Abscheidefunktion der Reinigungsanlage ermitteln [67 bis 69]. Der Korndurchsatz einschließlich der Reinigungsverluste läßt sich bei Kenntnis der Tausendkornmasse aus dem Integral der Abscheidefunktion berechnen.

2.1.3 Schnittbreitenmessung

Zur genauen Ertragsberechnung ist neben der Bestimmung des Durchsatzes auch eine kontinuierliche Bestimmung der aktuellen Flächenleistung notwendig. Bei den zur Zeit angebotenen Ertragsmeßeinrichtungen wird zur Ermittlung der Flächenleistung lediglich die Fahrgeschwindigkeit gemessen. Die Schnittbreite wird durch die Arbeitsbreite des Schneidwerks vorgegeben. Bei einigen Ertragsmeßeinrichtungen kann der tatsächlich genutzte Anteil der Schneidwerksbreite zumindestens als geschätzter Wert manuell eingegeben werden. Verfahren zur automatischen Schnittbreitenmessung beim Mähdrusch sind in **Bild 10** schematisch dargestellt.

Eine automatische Bestimmung der tatsächlichen Schnittbreite durch den Anbau eines Tastbügels an den Halmteiler des Schneidwerks wurde von Herlitzius u. Schütze [70] beschrieben. Derartige Einrichtungen mit zwei Tastbügeln wurden

bereits zur Führung des Mähdreschers an der Bestandskante untersucht. Unter dem Druck einer Feder gleitet der Tastbügel an der Bestandskante entlang, wobei der nicht genutzte Abstand zwischen der Schneidwerkskante und dem Bestand durch die Winkelauslenkung des Tastbügels erfaßt und mit einem Potentiometer in eine elektrische Spannung umgewandelt wird. Anwendungsgrenzen für die mechanische Schnittbreitenmessung bilden die geringe Steifheit der Getreidehalme und die begrenzte Reichweite des Tastbügels.

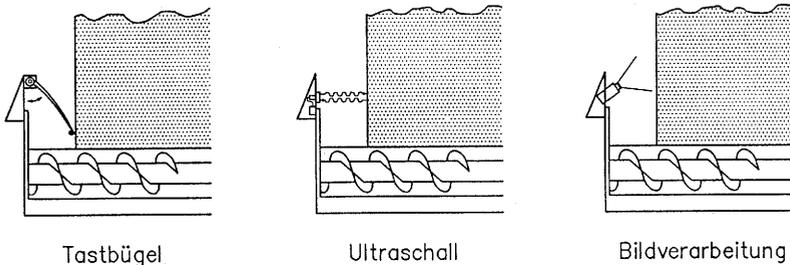


Bild 10: Verfahren zur Schnittbreitenmessung beim Mähdrusch

Versuche zur berührungslosen Schnittbreitenmessung mit einem Ultraschallabstandssensor wurden von Vansichen u. De Baerdemaeker [71] durchgeführt. Von dem am Halmteiler befestigten Sensor werden Ultraschallwellen ausgesendet, die an den Halmen der Bestandskante reflektiert und wieder am Sensor empfangen werden. Die Abstandsermittlung erfolgt durch die sensorinterne Auswerteelektronik über eine Bestimmung der Signallaufzeit. Die Ergebnisse zeigen, daß die Ultraschallsensoren den rauen Einsatzbedingungen am Schneidwerk standhalten. Begrenzt wird die Auflösung der Schnittbreitenmessung bei der Getreideernte durch den Saatreihenabstand. Um Abweichungen dieser Größenordnung (ca. 0,12 m) nicht zu überschreiten, mußte eine senkrechte und scharf begrenzte Bestandskante vorliegen.

Schönfelder u. Niproschke [72] untersuchten Methoden der digitalen Bildverarbeitung zur Ermittlung der Bestandshöhe und der tatsächlich genutzten Schnittbreite beim Mähdrusch. Es wurden zwei Kameras in Bodennähe am linken Halmteiler montiert, mit denen zunächst nur die Bestandskante in einem

Bereich von 2,5 m vor dem Schneidwerk stereometrisch erfaßt wurde. Die Bildauswertung konzentrierte sich auf die Bestimmung eines Punktes der Bestandsoberkante, die durch eine Veränderung der Helligkeit und der Struktur der Bildinhalte gekennzeichnet ist. Die Höhe und die Entfernung dieses Punktes zu den Kameras wurde aus den geometrischen Verhältnissen bestimmt. Um Störungen durch durchscheinendes Licht und querliegende Halme zu unterdrücken, ist eine Aufbereitung der Bilder notwendig noch bevor die ermittelten Meßwerte Gültigkeitskontrollen unterzogen werden. Da die Bildverarbeitung eine hohe Prozessorleistung erfordert, wurden Bildaufnahme und -verarbeitung entkoppelt, so daß keine online-Erfassung stattfand.

2.2 Modellierung der Gutströme

Mit der Entwicklung von Simulationsmodellen zur Beschreibung der dynamischen Prozesse im Mähdrescher wurde vorrangig das Ziel verfolgt, das Betriebsverhalten unter verschiedenen Einsatzbedingungen vorherzusagen. Hieraus wurden Strategien zur Konstruktion, Einstellung und Regelung des Mähdreschers abgeleitet. Als Optimierungskriterien wurden beispielsweise die Minimierung des Kornverlustes, der Kornbeschädigung oder der Erntekosten verwendet. Um die komplexen Zusammenhänge der Förder-, Dresch- und Trennprozesse im Mähdrescher mathematisch zu beschreiben, wurden zunächst die Teilprozesse separat modelliert.

Kirk u.a. [73] erstellten anhand der Massenströme ein Verschaltungskonzept, um aus den einzelnen Funktionsblöcken der Teilprozesse den gesamten Mähdrescher zu modellieren. Hierauf aufbauend entwickelte Campbell [74] ein komplexes Simulationsmodell für einen konventionellen Mähdrescher. Zur Beschreibung der Teilprozesse wurde generell ein Übertragungsverhalten aus Totzeitglied und Verzögerung erster Ordnung angenommen. Die für die Totzeiten maßgeblichen Verweildauern in den einzelnen Förder-, Dresch- und Trennelementen wurden experimentell an einem Versuchsmähdrescher bestimmt. Die einzige Eingangsgröße für die Simulation stellte der Gutdurchsatz dar.

Huisman [75] verwendete in seinen Untersuchungen zur Erntekostenoptimierung ein ähnliches Modell, in das er auch das Übertragungsverhalten der Antriebe für Fahrgeschwindigkeit und Dreschtrommel einbezog.

Mailander u. Krutz [76] stellten ein Modell zur Simulation eines Axialflußmähdreschers bei der Maisernte vor. Zur Beschreibung der Funktionsblöcke Dreschen, Korn/Stroh- und Korn/Spreu-Trennung wurde ein Modell, das auf der Annahme einer exponentiellen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beruht, angewendet.

Bae u.a. [77] verwendeten ein Modell zur Beschreibung des Guttransportes im Mähdrescher, um aus den Meßwerten eines auf dem Kornelevator montierten Korndurchsatzmeßgerätes den Korndurchsatz bei der Gutaufnahme am Schneidwerk zu bestimmen. Eine genaue Beschreibung der Förder-, Dresch- und Trennprozesse wurde aufgrund der Komplexität des Gutflusses und der Schwierigkeiten bei der Messung als nicht durchführbar angesehen. Deshalb entschied man sich, das Übertragungsverhalten des gesamten Mähdreschers, beginnend bei der Gutaufnahme am Schneidwerk $\dot{m}_{K,F}$ zum Zeitpunkt t_0 bis hin zur Meßstelle für den Korndurchsatz $\dot{m}_{K,S}$, durch eine Totzeit T_t und eine Zeitverzögerung erster Ordnung T_1 zu beschreiben, **Bild 11**.

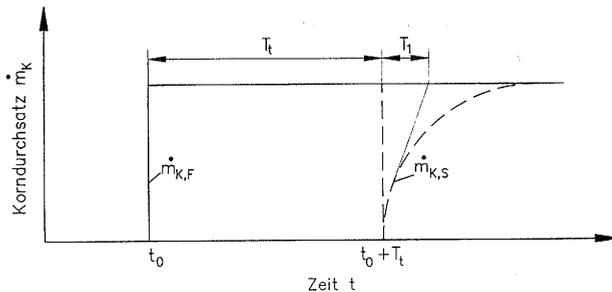


Bild 11: Modellierung des Gutflusses im Mähdrescher als Totzeitglied mit Verzögerung erster Ordnung (Übergangsfunktion)

Ein möglicher Kornverlust wurde nicht berücksichtigt. Die durch den Guttransport bedingte Totzeit T_t und die durch die Aufteilung des Gutes in der Maschine bedingte Zeitkonstante T_1 wurden aus den zuvor gefilterten Daten, die beim Anschneiden des Bestandes mit konstanter Fahrgeschwindigkeit aufgezeichnet

wurden, experimentell bestimmt. In den durchgeführten Versuchen wurde bereits ersichtlich, daß sich der Wert für die Zeitkonstante unter den verschiedenen Erntebedingungen ändert, was für eine Anwendung des Modells eigentlich nicht zulässig ist. Außerdem wurde festgestellt, daß die Totzeit eine negative Korrelation mit dem Korndurchsatz aufzeigt [50].

Nach Vansichen u. De Baerdemaeker [6] verursacht die Inversion des Modells, die zur Bestimmung des am Schneidwerk aufgenommenen Kornstroms notwendig ist, eine Verstärkung von höheren Frequenzen im Durchsatzmeßsignal. Um einer Verstärkung von Meßfehlern in diesen Frequenzbereichen entgegenzuwirken, kombinierten sie das invertierte Modell mit einem Tiefpaßfilter.

2.3 Durchsatzregelung

Durch den Einsatz von Durchsatzregelungseinrichtungen sollen die Fahrgeschwindigkeit und die Dresch- und Trennorgane des Mähdreschers derart automatisch eingestellt werden, daß die Maschine möglichst nahe an ihrer Leistungsgrenze betrieben wird. Die Leistungsfähigkeit eines Mähdreschers wird durch den NKB-Durchsatz \dot{m}_{NKB} angegeben, bei dem der Kornverlust einen vorgegebenen Wert V_{Kzul} (ca. 1 - 2 %) nicht überschreitet, **Bild 12**.

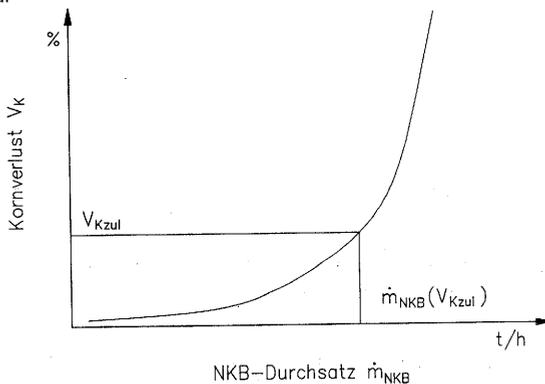


Bild 12: Durchsatz/Verlust-Kennlinie eines Mähdreschers

Da der Kornverlust überproportional mit dem Durchsatz ansteigt, bewirkt bereits eine geringe Steigerung des NKB-Durchsatzes beim Betrieb an der Leistungsgrenze einen starken Anstieg des Kornverlustes. Der Betrieb an der Leistungsgrenze wird außerdem dadurch erschwert, daß der Verlauf der Durchsatz/Verlust-Kennlinie eines Mähdreschers nicht nur von dessen Konstruktion und Einstellung sondern auch von den Erntebedingungen und Stoffeigenschaften abhängt [78]. Änderungen des Ertrags, der Erntebedingungen und der Stoffeigenschaften wirken somit als Störgrößen auf die Durchsatzregelungseinrichtungen.

Es wurden zunächst Regelungseinrichtungen entwickelt, bei denen der Gutchurchsatz möglichst frühzeitig mit den in [34] beschriebenen indirekt wirkenden Belastungsmeßeinrichtungen im Schneidwerk, Schrägförderer oder Dreschwerk bestimmt und die Fahrgeschwindigkeit durch das Lastsignal mechanisch oder hydraulisch geregelt wurde. Da die Meßwerterfassung jedoch erst nach der Gutaufnahme stattfindet, können durch die alleinige Regelung der Fahrgeschwindigkeit lediglich langwellige Ertragsänderungen nachgeregelt werden [42]. Störungen im Gutfluß durch bereits aufgenommenes Gut können hiermit jedoch nicht ausgeglichen werden. Durch die zusätzliche Regelung der Dreschtrommel-drehzahl läßt sich der Gutfluß in der Maschine nach Untersuchungen von Eimer [34] und Huisman [75] vergleichmäßigen. Entsprechendes gilt auch für die Regelung der Fördergeschwindigkeit im Schrägförderer.

Die Einbeziehung von Kornverlustsensoren in den Regelkreis bietet durch die Rückführung des tatsächlichen Kornverlustes eine weitere Verbesserung der Durchsatzregelung [39,79,80]. Eingesetzt werden Prallplatten, die über den Schüttler und die Reinigungsanlage hinausgeförderte Körner erfassen. Da jedoch nicht alle Verlustkörner auf die Prallplatten auftreffen, werden die Verluste lediglich in ihrer Tendenz angezeigt. Eine Regelung ausschließlich nach dem Kornverlust arbeitet aufgrund der Durchlaufzeit des Guts in der Maschine zu träge. Wird zusätzlich zu dem Kornverlust auch die Abscheidung unter den Dresch- und Trennorganen erfaßt, läßt sich aus den Meßwerten der Abscheidesensoren ein auf ein vorgegebenes Kornverlustniveau bezogenes Signal ableiten, das zur Durchsatzregelung verwendet werden kann [81].

Aufgrund der sehr späten Meßwerterfassung, der Trägheit der Stelleinrichtungen und der Tatsache, daß der Fahrer nur begrenzten Beschleunigungen ausgesetzt werden darf, ergibt sich bei den beschriebenen Regelungseinrichtungen immer eine Totzeit zwischen dem Auftreten und dem Ausregeln einer Störgröße. Mit der Entwicklung von Verfahren zur Vorfeldabtastung wurde deshalb das Ziel verfolgt, das Ertragsniveau des örtlich vor dem Mähdrescherschneidwerk liegenden Bestandes zumindestens abzuschätzen, um die Regelung bereits vor der Gutaufnahme einzuleiten. Vorrichtungen, bei denen der zufließende Gutstrom mit einer vor dem Schneidwerk befestigten, in den Bestand ragenden Schubstange [82] oder die Bestandsdichte mit Hilfe von Ultraschallmeßeinrichtungen [83] bestimmt werden sollen, wurden bereits beschrieben. Die direkte Messung vor dem Schneidwerk wird allerdings durch das Auftreten von verschiedenen Störeinflüssen wie am Boden liegende Getreidehalme (Lagergetreide), Verunkrautung oder Steinbesatz erheblich beeinträchtigt, so daß kein Verfahren der Vorfeldabtastung bisher zur Praxisreife entwickelt wurde. Auch die Erfassung des vor dem Schneidwerk liegenden Bestandes mittels digitaler Bildanalyse konnte bislang noch nicht in Regelungseinrichtungen auf dem Mähdrescher eingesetzt werden. An Algorithmen zur Bestimmung der Bestandshöhe und an einer Steigerung der Bildverarbeitungsgeschwindigkeit wird gearbeitet [72].

Da die Reichweite einer Vorfeldabtastung auf wenige Meter vor dem Schneidwerk begrenzt ist, läßt sich auch bei einer genauen Meßwerterfassung ein verspätetestes Ansprechen der Stelleinrichtungen, insbesondere bei schlagartigen Änderungen im Bestand oder bei hohen Fahrgeschwindigkeiten, nicht ausschließen. Untersuchungen zur Regelung eines Mähdreschers unter Verwendung von geokodierten Ertragsdaten oder anderen den Betrieb beeinflussenden geokodierten Prozeßgrößen oder Bestandsmerkmalen wurden bisher nicht veröffentlicht.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Erfassung geokodierter Kornertragsdaten

Zur Kartierung des Kornertrags während der Getreideernte mit dem Mähdrescher sind aufbauend auf eine genaue Datenerfassung verschiedene aufeinanderfolgende Schritte erforderlich, in denen die Meßwerte weiterverarbeitet werden.

Bild 13 zeigt den Ablaufplan zur Bestimmung von geokodierten Teilflächenertrags-Meßpunkten.

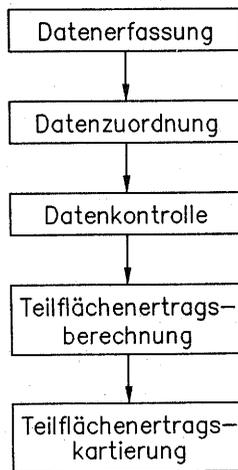


Bild 13: Ablaufplan für die Bestimmung von geokodierten Teilflächenertrags-Meßpunkten

Da die Korndurchsatzmessung mit den derzeit verfügbaren Meßverfahren erst nach der Gutaufnahme stattfindet, wird die minimale Ausdehnung der Teilflächen quer zur Fahrtrichtung des Mähdreschers durch die Schneidwerksbreite begrenzt. Um zu erreichen, daß die Ertragsmeßpunkte annähernd gleichmäßig über der gesamten Erntefläche verteilt liegen, ist die gleiche Ausdehnung auch in Fahrtrichtung anzustreben. Beim Einsatz eines Schneidwerks mit 5 m Arbeitsbreite ergeben sich somit ca. 400 Teilflächen pro Hektar, die in anschließenden Verarbeitungsschritten (z.B. Erstellung von Raster- oder Konturflächen) zusammengefaßt werden können.

Um die berechneten Ertragswerte den Teilflächen eindeutig zuzuordnen, darf die maximale Abweichung bei der Positionsbestimmung die halbe Schneidwerksbreite nicht überschreiten. Bei Einhalten dieser Forderung wird eine korrekte Zuordnung jedoch nur quer zur Fahrtrichtung und beim Ausnutzen der vollen Schneidwerksbreite gewährleistet. Die Zuordnung in Fahrtrichtung wird zusätzlich durch die Abweichung, mit der die Aufteilung der Kornströme im Mähdrescher und deren Durchlaufzeiten bestimmt werden, beeinflusst.

In der vorliegenden Arbeit erfolgt die **Datenerfassung** kontinuierlich während des Erntevorgangs mit den in Kap. 4 beschriebenen Meßeinrichtungen zur Bestimmung der Position (x, y) und der Meßgrößen Kornmassenstrom \dot{m}_K , Kornfeuchtegehalt U_K , Fahrgeschwindigkeit v_F und Schnittbreite b_S . Da beim Mähdrusch ein Kornverlust nie vollständig vermieden werden kann, muß bei der Bestimmung des Kornmassenstroms beachtet werden, daß nicht alle im Bestand enthaltenen Körner an der Korndurchsatzmeßeinrichtung vorbei in den Korrtank gefördert werden. Während die Körner von ausgefallenen Ähren und die Schneidwerksverluste auf dem Feld verbleiben und nicht erfaßt werden, lassen sich die Trenn- und Reinigungsverluste am Ausgang der Maschine mit den bekannten Kornverlustsensoren bei regelmäßiger Kalibrierung zumindestens näherungsweise bestimmen. Eine genaue Bestimmung ist nicht möglich, da ein Teil der Verlustkörner in der Strohmatte verbleibt und nicht auf die Sensoren geleitet wird.

Bei der **Datenzuordnung** werden die erfaßten Meßwerte dem Zeitpunkt und der Position der Gutaufnahme zugeordnet. Fahrgeschwindigkeit und Schnittbreite werden zeitgleich mit der Position gemessen. Bei den Meßgrößen Kornmassenstrom, Kornfeuchtegehalt und Kornverlust ist aufgrund des Guttransportes vom Schneidwerk bis zu den Einbauorten der entsprechenden Meßeinrichtungen und deren Ansprechverzögerungen eine Zuordnung auf den Zeitpunkt, an dem sich der Mähdrescher während der Gutaufnahme befunden hat, erforderlich. Werden die Fahrgeschwindigkeit oder die Schnittbreite während des Ernteablaufs verändert, würde die Ertragsberechnung ohne eine Datenzuordnung nicht korrekt erfolgen.

Zur exakten zeitlichen Zuordnung muß der Guttransport ausgehend von den Einbauorten der Meßeinrichtungen bis zur Gutaufnahme zurückverfolgt werden. In **Bild 14** ist die Aufteilung der im Gutstrom enthaltenen Korn- und NKB-Massenströme in einem konventionellen Mährescher, bei dem die Überkehr auf den Vorbereitungsboden geleitet wird, schematisch dargestellt.

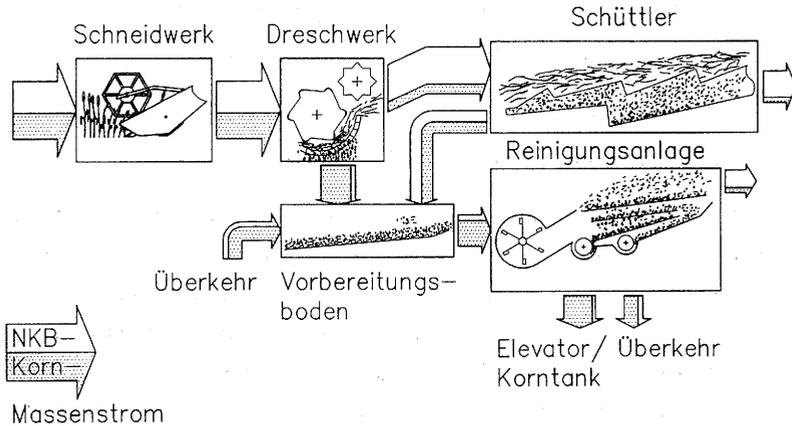


Bild 14: Guttransport in einem konventionellen Mährescher mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler

Die Bestimmung des zum Zeitpunkt t_0 am Mähmesser aufgenommenen Kornmassenstroms wird besonders dadurch erschwert, daß der Gutstrom in den verschiedenen Förder-, Dresch- und Trennelementen mehrmals aufgeteilt und wieder zusammengeführt wird und die einzelnen Teilströme die Maschine auf unterschiedlichen Wegen durchlaufen.

Eine Vermischung des Ernteguts beginnt bereits im Schneidwerk. Durch die Querförderung mit der Einzugschnecke werden die an der Außenkante geschnittenen Halme gegenüber den vor den Einzugsfingern stehenden dem Schrägförderer zeitversetzt zugeführt. Der bei der Querförderung vom Mährescher zurückgelegte Weg Δs_Q ergibt sich unter Beachtung von **Bild 15** als **Gl. (1)** zu:

$$\Delta s_Q = \frac{b_S - b_{SF}}{2 \cdot v_Q} \cdot v_F \quad (1)$$

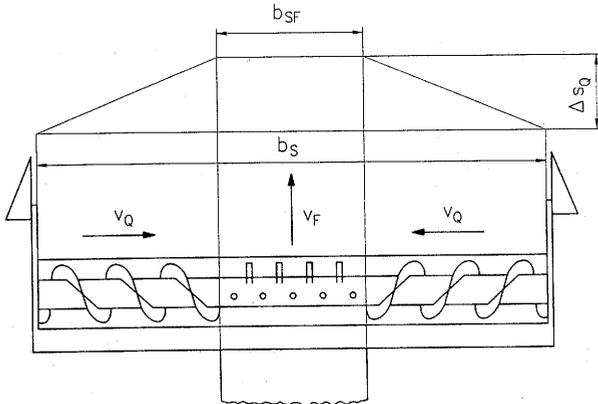


Bild 15: Vermischung des Gutstroms im Schneidwerk

Im Dreschwerk wird der vom Schrägförderer zugeführte Gutstrom aufgeteilt. Der Dreschwerkwirkungsgrad η_D , der das Verhältnis des am Dreschwerk abgeschiedenen zum zugeführten Kornmassenstrom beschreibt, ist dabei nicht konstant. Unmittelbar wird der Dreschvorgang durch die Konstruktion und die Einstellung des Mähdreschers sowie durch die Stoffeigenschaften des Ernteguts beeinflusst. Typische Verläufe des Dreschwerkwirkungsgrades in Abhängigkeit vom auf die Dreschwerksbreite bezogenen NKB-Durchsatz \dot{m}'_{NKB} und der Dreschtrommelumfangsgeschwindigkeit v_U sind nach Ergebnissen von Wacker [84] in **Bild 16** dargestellt.

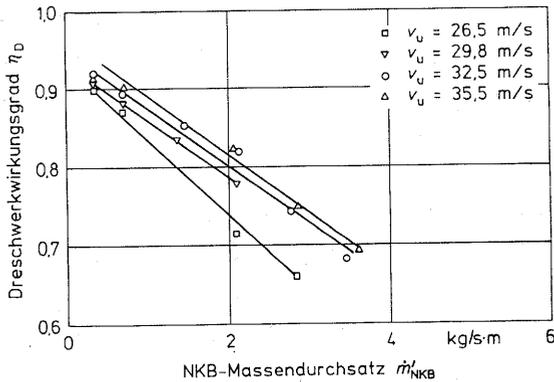


Bild 16: Dreschwerkwirkungsgrad als Funktion des NKB-Massendurchsatzes \dot{m}'_{NKB} und der Dreschtrommelumfangsgeschwindigkeit v_U nach [84]

Neben der Aufteilung des Kornmassenstroms muß auch die Kornabscheidung über der Länge der Dresch- und Trennelemente zur genauen Ermittlung der Teilströme bestimmt werden, da die Durchlaufzeiten sich aus der Fördergeschwindigkeit und der Länge der Förderwege ergeben. Typische Verläufe der Kornabscheidung über der Sieblänge der Reinigungsanlage zeigt **Bild 17** nach Ergebnissen von Böttinger [68]. Entsprechende Abscheideverläufe über der Schüttlerlänge sind bei Büermann [85] zu finden.

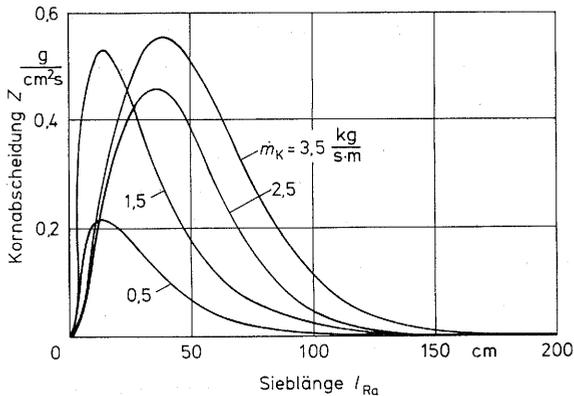


Bild 17: Kornabscheidung Z über der Sieblänge der Reinigungsanlage in Abhängigkeit vom Kornmassenstrom \dot{m}_K nach [68]

Zusätzlich zu den bei der Betrachtung des Dreschvorgangs genannten Einflußgrößen wirkt sich auch die durch die Geländeform bedingte Neigung des Mähdreschers auf die Abscheidung bei den Trennvorgängen und die Förderung in den Körnerschnecken aus.

Eine weitere Vermischung des Gutstroms wird durch die Rückführung des Überkehrmassenstroms verursacht, der entweder einem zusätzlichen Dreschvorgang unterzogen und anschließend auf den Vorbereitungsboden geleitet wird (Bild 14), oder über einen Elevator dem Dreschwerk erneut zugeführt wird.

Aufgrund der dargestellten Komplexität der Förder-, Dresch- und Trennvorgänge im Mähdrescher wird es deutlich, daß es nicht möglich ist, den Guttransport allein aus den Signalen der Meßeinrichtungen zurückzuverfolgen.

Bischoff u. a. [69,86] entwickelten ein Multisensormeßsystem zur Erfassung der Kornteilströme in Dreschwerk, Schüttlerücklauf, Reinigungsanlage und Überkehr. Sie verwendeten dazu unter den Abscheideflächen angeordnete, stabförmige Meßfühler, die über Piezokeramiken die Anzahl der auftreffenden Körner erfassen. Zusätzlich wurden auch die Schichthöhe der Strohmatte auf dem Schüttler und der in den Korntank geförderte Korndurchsatz gemessen. Das System ermöglicht durch einen relativen Vergleich der Meßwerte eine Analyse und Regelung der Dresch- und Trennprozesse. Zur Bestimmung des Kornmassenstroms müßten die Abscheideverläufe, auch die über der Schüttlerlänge, jedoch quantitativ erfaßt werden, was mit den piezoelektrischen Meßfühlern derzeit nicht möglich ist.

Die Bestimmung des am Schneidwerk aufgenommenen Kornmassenstroms durch eine mathematische Modellierung des Guttransports im Mähdrescher verlangt neben der Entwicklung geeigneter Modellgleichungen auch die genaue Kenntnis der auf die Förder-, Dresch- und Trennprozesse wirkenden Einflußgrößen. Die konstruktiven Parameter eines Mähdreschers sind bekannt und werden normalerweise nicht verändert, die Einstellung dagegen wird im Ernteeinsatz laufend an unterschiedliche Betriebsbedingungen angepaßt. Während die Einstellwerte meßtechnisch relativ einfach erfaßt werden können, sind die zeit- und ortsabhängigen Variationen in den Erntebedingungen und den Stoffeigenschaften des Ernteguts meßtechnisch nur stichprobenartig und unter erheblichem Zeitaufwand erfaßbar. Außerdem muß bei der Modellierung berücksichtigt werden, daß der aufgenommene Gutdurchsatz selbst die Aufteilung und Fördergeschwindigkeit der Gutströme entscheidend beeinflusst. Bae u.a. [77] wiesen bereits darauf hin, daß das von ihnen verwendete Modell, bei dem das Übertragungsverhalten des gesamten Mähdreschers durch ein Totzeitglied mit Verzögerung erster Ordnung beschrieben wurde, zur genauen Bestimmung des aufgenommenen Kornmassenstroms nicht ausreicht, weil sich die Modellparameter in Abhängigkeit von den zum Erntezeitpunkt vorliegenden Einflußgrößen laufend ändern.

Da eine genaue Messung oder eine Modellierung der Kornströme im Mähre-scher noch nicht möglich ist, werden in der vorliegenden Arbeit experimentell bestimmte, mittlere Durchlaufzeiten T_t von der Gutaufnahme bis zu den Meß-orten für die zeitliche Datenzuordnung verwendet. Diese Durchlaufzeiten können im Feld überschlägig bestimmt werden, indem beim Einfahren in den Bestand oder bei einer signifikanten Änderung des Durchsatzes (z.B. durch eine schlag-artige Änderung der Fahrgeschwindigkeit oder der Schnittbreite) der Zeitversatz zwischen Gutaufnahme und Ansprechen der Meßeinrichtungen ermittelt wird. Durch eine kontrollierte Zuführung des Ernteguts unter Laborbedingungen lassen sich die Durchlaufzeiten mit geringen Abweichungen bestimmen.

Bild 18 zeigt das Prinzip der Datenzuordnung auf den Zeitpunkt und die Position der Gutaufnahme.

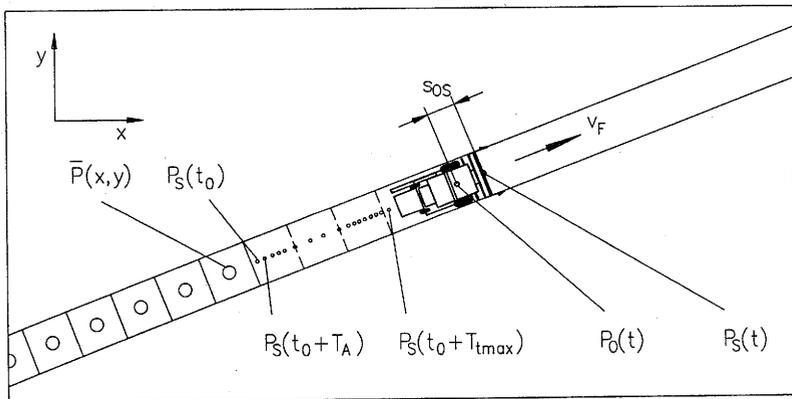


Bild 18: Zuordnung der Meßgrößen auf den Zeitpunkt und die Position der Gutaufnahme

Unter der Voraussetzung, daß der Bezugspunkt des Ortungssystems P_0 und die Mähmessermite P_S im Abstand s_{OS} auf einer parallel zur Fahrzeuglängsachse verlaufenden Geraden liegen, werden die mit einer festen Abtastrate T_A aufgezeichneten Datensätze $P(t)$ zunächst nach Gl. (2) der Position der Mähmessermite P_S zugeordnet.

$$\begin{pmatrix} x_{PS}(t) \\ y_{PS}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{PO}(t) \\ y_{PO}(t) \end{pmatrix} + \frac{s_{OS}}{s_F(t)} \cdot \begin{pmatrix} x_{PO}(t) - x_{PO}(t - T_A) \\ y_{PO}(t) - y_{PO}(t - T_A) \end{pmatrix} \quad (2)$$

Von den meisten Ortungssystemen wird die Fahrtrichtung auch direkt ausgegeben. Die innerhalb der Abtastrate T_A zurückgelegte Fahrstrecke s_F berechnet sich aus:

$$s_F(t) = v_F(t) \cdot T_A = \sqrt{(x_{PO}(t) - x_{PO}(t - T_A))^2 + (y_{PO}(t) - y_{PO}(t - T_A))^2} \quad (3)$$

Erst nachdem der Kornstrom die Meßeinrichtung mit der längsten Durchlaufzeit T_{tmax} passiert hat und ein Meßsignal vorliegt, werden dem um diese Zeit zuvor aufgezeichneten und zwischengespeicherten Datensatz $P_S(t_0)$ die auf den Schnittzeitpunkt bezogenen Meßgrößen zugeordnet. Bei einer Abtastrate von $T_A = 1$ s und einer für den Mähdrusch durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 1,25$ m/s ergibt sich ein maximaler Zuordnungsfehler von 1,25 m. Ohne die Datenzuordnung würde dieser Fehler um das Produkt aus Fahrgeschwindigkeit und Durchlaufzeit höher ausfallen. Die längsten Durchlaufzeiten ergeben sich für Meßeinrichtungen, die in der Korntankbefüllschnecke angebracht sind. Bei dem für die Untersuchungen eingesetzten konventionellen Mähdrescher mittlerer Leistungsklasse wurde eine maximale Durchlaufzeit von ca. 16,5 s ermittelt (siehe Kap. 5.5). Abhängig von der Bauart und der Größe des Mähdreschers sind Durchlaufzeiten bis zu 25 s möglich.

Als nächster Schritt wird eine **Datenkontrolle** durchgeführt. Dazu werden alle in einem Datensatz gespeicherten Meßgrößen sowohl einzeln als auch in Beziehung zueinander verschiedenen Plausibilitätskontrollen unterzogen. Es wird zunächst überprüft, ob für alle Meßeinrichtungen die entsprechenden Meßsignale in den vorgegebenen Meßbereichen vorliegen.

Befindet sich der Mähdrescher außerhalb des Bestands ($b_S = 0$), was z.B. durch Anheben des Schneidwerks, Unterbrechung des Gutstroms im Schrägförderer und anhand der Signale der Schnittbreitenmeßeinrichtung festgestellt werden kann, wird die Berechnung der Flächenleistung unterbrochen. Bei korrekter

Datenzuordnung dürfen die Datensätze dann auch nur Korndurchsatzmeßwerte von $\dot{m}_K = 0$ enthalten. Entsprechendes gilt auch für Standzeiten des Mähdeschers.

Außerdem wird anhand der Signale der Kornverlustsensoren überprüft, ob ein vorgegebenes Verlustniveau überschritten worden ist. Dies würde nicht nur zu Abweichungen bei der Korndurchsatzmessung führen, sondern auch die Datenzuordnung verfälschen, da ein hoher Kornverlust auf hohe Kornabscheidungen am Ende der Trennelemente und somit auf längere Durchlaufzeiten schließen läßt.

Nur bei Erfüllung aller Kriterien werden die Meßgrößen des Datensatzes weiterverarbeitet, andernfalls wird der Datensatz als fehlerhaft bewertet.

Bei der nachfolgenden **Teilflächenertragsberechnung** werden die während des Ernteablaufs kontinuierlich aufgezeichneten Datensätze derart zusammengefaßt, daß jede abgeerntete Teilfläche durch einen repräsentativen Datensatz $\bar{P}(x,y)$ beschrieben wird. Die Größe der Teilflächen wird durch die Schnittbreite und durch die Vorgabe einer im Bestand zurückgelegten Fahrstrecke festgelegt. Verläßt der Mähdescher vor Erreichen der vorgegebenen Fahrstrecke den Bestand oder tritt ein fehlerhafter Datensatz auf, wird die Ertragsberechnung nach Gl. (4) für diese Teilfläche nicht durchgeführt. Fahrstrecken außerhalb des Bestands, Standzeiten und fehlerhafte Datensätze werden so von der Ertragskartierung ausgeschlossen.

$$m_K'' = \frac{\dot{m}_K}{v_F \cdot b_S} \cdot \frac{1 - U_K}{1 - U_{Kbez}} \quad (4)$$

Da die Anzahl der in einer Teilfläche aufgezeichneten Datensätze von der Abtastrate und der Fahrgeschwindigkeit abhängt, ist die Teilflächenertragsberechnung über einen arithmetischen Mittelwert nicht zulässig. Wird die Fahrgeschwindigkeit oder die Schnittbreite innerhalb einer Teilfläche geändert, würden die bei niedriger Flächenleistung berechneten Kornerträge überbewertet werden.

Um diesen Einfluß zu kompensieren, wird bei der Berechnung des Teilflächen-
ertrags $m_K''(x,y)$ jeder Ertragswert $m_K''(t)$ mit der innerhalb der Abtastrate T_A
abgeernteten Fläche $A(t)$ nach **Gl. (5)** gewichtet.

$$m_K''(x,y) = \frac{\sum (m_K''(t) \cdot A(t))}{\sum A(t)} \quad (5)$$

Bei der **Teilflächenkartierung** wird der Ertragsmittelwert dem Teilflächenmittel-
punkt zugeordnet und als Ertragsmeßpunkt gespeichert. Durch die Zusammen-
fassung zu Teilflächenmittelwerten wird Abweichungen bei der Berechnung des
Kornertrags, die aus der Datenzuordnung resultieren, zwar entgegengewirkt, sie
lassen sich für Fahrstrecken, die der Schneidwerksbreite entsprechen, jedoch
nicht vollständig beseitigen. Dies muß bei der Weiterverarbeitung der Ertrags-
meßpunkte berücksichtigt werden, indem mehrere Teilflächenertragswerte zu
größeren Einheiten zusammengefaßt werden oder Nachbarschaftsanalysen
durchgeführt werden. Hierfür bieten geographische Informationssysteme ver-
schiedene Möglichkeiten an, mit denen diskrete Strukturmerkmale, wie der Korn-
ertrag, in thematischen Karten verarbeitet, dargestellt und verknüpft werden
können.

3.2 Betrieb des Mähdeschers mit geokodierten Teilflächendaten

Zur Umsetzung von geokodierten Teilflächendaten sind bereits verschiedene
Verfahren und Vorrichtungen vorgestellt worden, die bei den der Ernte nachfol-
genden teilflächenspezifischen Bewirtschaftungsmaßnahmen Anwendung finden
(z.B. Bodenbearbeitung, Saat, Düngung, Pflanzenschutz) [87 bis 89]. Vor den
betreffenden Arbeitsgängen werden geokodierte Bearbeitungs- oder Applika-
tionsdateien für die Gesamtfläche erzeugt und auf den Bordcomputer der Ar-
beitsmaschinen übertragen. In Verbindung mit einem Ortungssystem erfolgt
deren Einstellung automatisch angepaßt an die für die aktuelle Position vor-
gesehene Bearbeitungsintensität oder Ausbringmenge.

Bei den Erntearbeiten, wie dem Mähdrusch, bietet eine automatische Anpassung der Fahrgeschwindigkeit und Einstellung der Arbeitsorgane an die in der momentan abzuerntenden Teilfläche vorliegenden Erträge, Erntebedingungen und Ernteguteigenschaften weitere Möglichkeiten zur Steigerung der Maschinenauslastung und zur Entlastung der Bedienperson. Erhält der Bordcomputer des Mähdreschers Zugriff auf geokodierte Daten, die sich auf die vor dem Schneidwerk gelegenen und noch nicht geernteten Teilflächen beziehen, lassen sich die durch die verspätete Meßwerterfassung bedingten Nachteile der in Kap. 2.3 beschriebenen Regelungseinrichtungen beseitigen.

Ertragskarten aus vorangegangenen Ernten können hierzu jedoch nur bedingt verwendet werden, da die lokalen Ertragsunterschiede innerhalb eines Feldes in Abhängigkeit von der Fruchtart und den Witterungsverhältnissen variieren. Aktuelle Ertragskarten ließen sich aus direkt vor der Ernte aufgenommenen Luft- oder Satellitenbildern ableiten [90,91]. Die Auswerteverfahren zur Fernerkundung in der Landwirtschaft genügen den an die Ertragsbestimmung gestellten Genauigkeitsanforderungen aber derzeit noch nicht. Im folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem zur Maschineneinstellung benötigte Größen von noch nicht geernteten Teilflächen aus den bekannten Größen von benachbarten, bereits geernteten Teilflächen direkt während des aktuellen Ernteablaufs vorausberechnet werden.

Das Prinzip des Verfahrens ist in **Bild 19** am Beispiel der Ertragsvorausberechnung dargestellt. Die bekannten Ertragsmeßpunkte der bereits abgeernteten Feldfläche (vgl. Kap. 3.1) sind durch markierte Teilflächen dargestellt.

Die Position P_3 der Teilfläche, für die die Vorausberechnung durchgeführt werden soll, wird nach **Gl. (6)** bestimmt, indem die Strecke s_V von der aktuellen Position des Schneidwerks P_2 aus in Fahrtrichtung abgetragen wird. Die Fahrtrichtung wird **Gl. (2)** und **(3)** entsprechend aus der Differenz zwischen aktueller Position P_2 und vorheriger Position P_1 berechnet oder dem Ortungssystem entnommen.

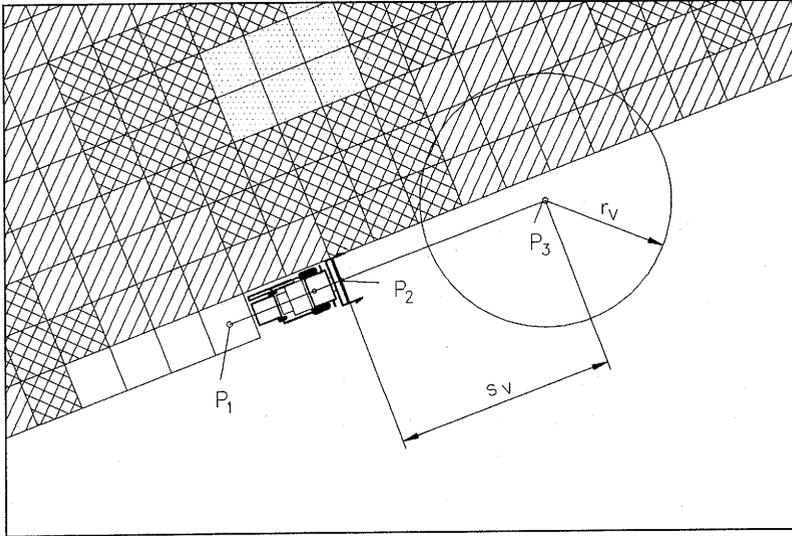


Bild 19: Prinzip der Ertragsvorausberechnung

$$\begin{pmatrix} x_{P3} \\ y_{P3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{P2} \\ y_{P2} \end{pmatrix} + \frac{s_V}{s_F} \cdot \begin{pmatrix} x_{P2} - x_{P1} \\ y_{P2} - y_{P1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Die durch die Strecke s_V definierte Entfernung zwischen dem Schneidwerk und der für die Einstellung relevanten Position lässt sich im Gegensatz zu den Verfahren der Vorfeldabtastung (vgl. Kap. 2.4) an die aktuelle Fahrgeschwindigkeit und das Übertragungsverhalten der Stellglieder anpassen.

Falls die Einstellung des Mähdreschers nicht über Steuerungs- oder Regelsysteme automatisch umgesetzt, sondern dem Fahrer als Hinweis visuell dargestellt wird, ist bei der Festlegung der Strecke s_V neben der Ansprechverzögerung der Stelleinrichtungen T_S auch die Reaktionszeit der Bedienperson T_R zu berücksichtigen.

$$s_V = v_F \cdot (T_S + T_R) \quad (7)$$

In die Vorausberechnung werden alle bekannten Ertragsmeßpunkte aus bereits abgeernteten, benachbarten Reihen einbezogen, deren Positionen P_i sich in einer durch den Radius r_v vorgegebenen Entfernung r_i von der Position P_3 befinden.

$$r_i = \sqrt{(x_{P_i} - x_{P_3})^2 + (y_{P_i} - y_{P_3})^2} \leq r_v \quad (8)$$

Verschiedene Verfahren zur Ertragsvorausberechnung werden in Kap. 7 beschrieben. Durch einen Vergleich der Vorausberechnung mit den tatsächlich gemessenen und kartierten Ertragsmeßwerten kann das Berechnungsverfahren hinsichtlich seiner Abweichungen während der Ernte ständig kontrolliert und gegebenenfalls korrigiert werden.

Zur Regelung der Arbeitsorgane läßt sich aus dem vorausberechneten Kornertrag $m_K''(x_{P_3}, y_{P_3})$, der Fahrgeschwindigkeit v_F und der Schnittbreite b_S der zu erwartende Korndurchsatz \dot{m}_K nach Gl. (9) berechnen. Die Einstellung von Dreschspalt und Dreschtrommeldrehzahl, Sieböffnung und Gebläsedrehzahl der Reinigungsanlage oder der Förderorgane im Mähdrescher können dadurch frühzeitig an Durchsatzänderungen angepaßt werden.

$$\dot{m}_K = m_K''(x_{P_3}, y_{P_3}) \cdot v_F \cdot b_S \quad (9)$$

Zur Fahrgeschwindigkeitsregelung läßt sich bei gleichbleibender oder bekannter Schnittbreite b_S die Fahrgeschwindigkeit $v_{F,opt}$ bestimmen, bei der ein gleichmäßiger, der Mähdrescherkapazität angepaßter Korndurchsatz $\dot{m}_{K,opt}$ eingehalten wird, Gl. (10).

$$v_{F,opt} = \frac{\dot{m}_{K,opt}}{m_K''(x_{P_3}, y_{P_3}) \cdot b_S} \quad (10)$$

Um einen gleichmäßigen Mähdrescherbetrieb zu erreichen, sollte auf geringe Durchsatzänderungen vorrangig durch eine Regelung der Förder-, Dresch- und Trennprozesse reagiert werden. Eine übergeordnete Regelung der Fahrgeschwindigkeit sollte erst in Abhängigkeit vom Arbeitsergebnis der Teilprozeßregelungen und bei hohen Durchsatzänderungen einsetzen.

Der für das jeweilige Erntegut und die Erntebedingungen als optimal angesehene Korndurchsatz $\dot{m}_{K,opt}$ kann vom Bordcomputer anhand von experimentell bestimmten und gespeicherten Werten vorgegeben werden, oder er wird vom Fahrer bei Erreichen eines als optimal angesehenen Betriebszustandes festgelegt. Da alle Meßwerte bei der Kartierung dem Zeitpunkt der Gutaufnahme zugeordnet werden, ist es auch möglich, den Einfluß des Korndurchsatzes auf den Kornverlust unter den aktuellen Erntebedingungen zu ermitteln. Dies kann bereits bei der Ernte der ersten Reihen erfolgen, wo noch keine Meßwerte für die Vorausberechnung vorliegen.

Eine vorausschauende Regelung des Mähdrescherbetriebs läßt sich mit dem vorgestellten Verfahren nicht nur mit dem Korndurchsatz als Führungsgröße durchführen, sondern auch auf den NKB-Durchsatz übertragen, der das Betriebsverhalten des Mähdreschers wesentlich mehr beeinflusst. Hierzu können die Signale der in Kap. 2.1.2 beschriebenen Belastungsmeßeinrichtungen kartiert werden. Im Gegensatz zur Ertragsberechnung genügt zur Regelung eine Meßeinrichtung, die den NKB-Durchsatz nur qualitativ bestimmt. Durch die Verwendung eines möglichst frühzeitigen Meßsignals, wie dem Drehmoment der Einzugsschnecke oder des Schrägförderers, ist es auch möglich, den Trend der aktuellen Meßsignale in die Vorausberechnung miteinzubeziehen. Bei der Regelung nach dem vorausberechneten NKB-Durchsatz muß neben der Schnittbreite auch die Schnitthöhe meßtechnisch erfaßt oder durch eine Schnitthöhenregelung konstant gehalten werden.

Neben der Regelung des Betriebs von Mähdreschern oder anderen Erntemaschinen mit geokodierten Teilflächendaten läßt sich das vorgestellte Verfahren auch auf andere mobile Arbeitsmaschinen übertragen, die eine inhomogene Fläche teilflächenspezifisch bearbeiten sollen. Voraussetzungen hierfür sind ein geeignetes Ortungssystem, Sensoren zur Erfassung der für die Bearbeitung entscheidenden Meßgrößen und Aktoren zur Umsetzung der Einstellungsempfehlungen, **Bild 20**. Außerdem wird ein Bordcomputer benötigt, der die Meßgrößen oder daraus abgeleitete Größen in Bezug auf die Position, an der sie entstanden sind, kartiert und für die Weiterverarbeitung bereitstellt.

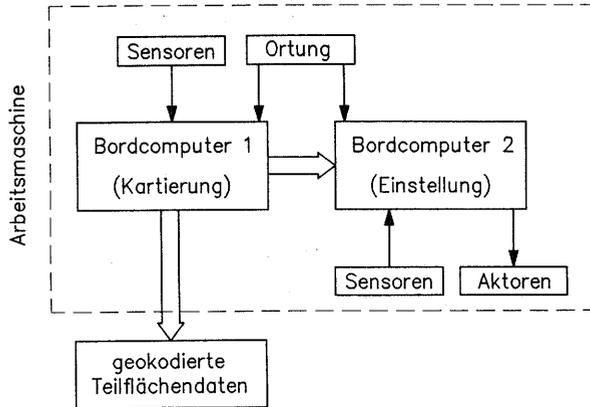


Bild 20: Betrieb von mobilen Arbeitsmaschinen mit geokodierten Teilflächendaten

Ein Anwendungsbeispiel ist in der teilflächenspezifischen Applikation von Pflanzenschutzmitteln mit einer direkt einspeisenden Feldspritze zu finden. Wird nicht nur die direkt vor der Arbeitsmaschine liegende Teilfläche mit einem Unkrauterkennungssystem (z.B. Bildanalyse) abgetastet, sondern wird es auch auf die seitlich gelegenen Teilflächen gerichtet, lassen sich erkannte Unkrautnester 'online' kartieren. Werden diese Teilflächen im Verlauf des weiteren Arbeitsgangs angefahren, läßt sich die Dosierung des Spritzmittels 'vorausschauend' auf- und abbauen. Hierdurch wird der Trägheit in der Steuerung derzeitiger Systeme entgegengewirkt und es kann auf eine vorangegangene Unkrautkartierung verzichtet werden.

4 Aufbau und Funktion der verwendeten Meßeinrichtungen

4.1 Anforderungen

Aus der Kombination der in Kap. 2.1 beschriebenen Meßverfahren ergeben sich verschiedene Möglichkeiten, die für die Ertragskartierung benötigten Meßgrößen während der Getreideernte mit dem Mähdrescher zu erfassen. Bei der Auswahl der Meßeinrichtungen sind neben der Forderung nach geringen Meßabweichungen und angemessenem Preis folgende Anforderungen zu berücksichtigen.

- Die Funktion und Abweichungen der Meßeinrichtungen sollten nicht durch die beim Betrieb des Mähdreschers auftretenden Schwingungen und Neigungen, durch Staubentwicklung und Verschmutzung der Sensoren sowie durch die Erntebedingungen und Ernteguteigenschaften beeinträchtigt werden.
- Die Funktion des Mähdreschers muß auch bei einem Ausfall der Meßeinrichtungen gewährleistet sein.
- Die Qualität des Ernteguts darf nicht herabgesetzt werden.
- Eine unkomplizierte und schnelle Bedienung ist anzustreben, so daß der Fahrer nicht zusätzlich belastet wird und keine Verzögerungen im Arbeitsablauf entstehen.
- Eine Vorgabe des Ernteablaufs sollte vermieden werden, um sich flexibel auf die vorherrschenden Erntebedingungen und Ernteguteigenschaften, wie Lagergetreide oder Teilflächen mit hoher Gutfeuchte, einstellen zu können.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit robuste und vorwiegend berührungslose Meßeinrichtungen verwendet. Die Eingabeoperationen und Kalibrierungen sind auf ein Minimum beschränkt und erfolgen nur außerhalb des Ernteablaufs.

4.2 Positionsbestimmung

Zur Positionsbestimmung des Mähreschers wird die Satellitenortung mit dem DGPS eingesetzt. Sollen die Ertragskarten lediglich dazu genutzt werden, standortabhängige Ertragsunterschiede innerhalb eines Feldes zu dokumentieren, genügt es, die Positionskorrektur zu einem späteren Zeitpunkt nach der Ernte durchzuführen (Postprocessing-DGPS). Zur Regelung des Mährescherbetriebs mit geokodierten Teilflächendaten ist es wie auch bei der teilflächenbezogenen Düngung dagegen notwendig, die aktuellen Korrekturdaten der Referenzstation direkt während des Arbeitsgangs an die DGPS-Mobilstation zu übertragen und hier zu verarbeiten (Realtime-DGPS).

Die Erzeugung der Korrekturdaten und deren Verarbeitung erfolgt nach dem Positionskorrekturverfahren. Dazu berechnen der stationäre Empfänger der Referenzstation und der mobile Empfänger auf dem Fahrzeug die Schrägentfernung zu allen empfangenen Satelliten über die Laufzeit der ausgesendeten Signale. Da die berechneten Entfernungen noch mit systematischen Fehlern behaftet sind, werden sie als Pseudo-Entfernungen (pseudorange) bezeichnet. Beim Empfang von mindestens vier Satelliten läßt sich aus den Pseudo-Entfernungen die Position des Antennenstandorts dreidimensional (Längengrad, Breitengrad, geographische Höhe) berechnen, sie ist jedoch ebenfalls fehlerbehaftet. Ist die geographische Höhe bekannt, lassen sich bereits beim Empfang von drei Satelliten zweidimensionale Positionsergebnisse berechnen.

Zur Genauigkeitssteigerung ermittelt die Referenzstation aus der Differenz zwischen den bekannten Koordinaten ihres vermessenen Antennenstandorts und dem Ergebnis der Pseudoentfernungsmessungen Korrekturdaten, die mit zeitlicher und räumlicher Einschränkung einen Teil der systematischen Fehler dieser Satellitenkonstellation repräsentieren. Mit diesen Korrekturdaten können Fehler in den Bahndaten der Satelliten, Satellitenuhrenfehler, Fehler durch die Ablenkung der Satellitensignale in der Ionosphäre und der Troposphäre sowie die künstliche Verfälschung der Satellitensignale (Selective Availability) weitgehend eliminiert werden.

Die Korrekturdaten werden über eine Datentelemetriestrecke an die DGPS-Mobilstation übertragen und hier mit dem Ergebnis der Pseudoentfernungen verarbeitet. Außer den Positionskorrekturdaten werden von der Referenzstation auch Korrekturdaten für die Fahrgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag erzeugt und übermittelt.

Das **Positionskorrekturverfahren** ist durch die Korrektur der Endergebnisse der Positionsberechnung ein einfaches DGPS-Verfahren mit einem relativ geringen Softwareaufwand [26]. Voraussetzung für die Anwendung ist aber, daß sowohl die Referenzstation als auch die Mobilstation dieselben Satelliten zur Positionsberechnung verwenden.

Diese Einschränkung entfällt beim **Streckenkorrekturverfahren**, bei dem die Referenzstation aus der bekannten Position und den gemessenen Pseudoentfernungen Korrekturdaten zur Bestimmung der tatsächlichen Entfernung zu jedem empfangenen Satelliten berechnet. Die theoretische Positionsgenauigkeit ist bei beiden Verfahren identisch [92].

Ein weiterer Vorteil des Streckenkorrekturverfahrens besteht darin, daß das Übertragungsformat der Streckenkorrekturdaten bereits im RTCM SC-104 Format standardisiert wurde und viele DGPS-Empfänger diese Korrekturdaten direkt verarbeiten können. Es laufen bereits Pilotprojekte, in denen die standardisierten Korrekturdaten über den öffentlichen Rundfunk unter Nutzung des RDS (Radio Data System) übertragen werden [93]. Zum Empfang wird ein Autoradio mit RDS-Empfangsteil und ein entsprechender Decoder benötigt. Eine flächendeckende Korrekturdatenübertragung über RDS oder andere externe Einrichtungen war zur Zeit der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen noch nicht gegeben, so daß mit einer eigenen Referenzstation und Datentelemetriestrecke gearbeitet wurde.

In **Bild 21** ist der Aufbau der Datenverarbeitung und -übertragung des für die Untersuchungen eingesetzten DGPS-Ortungssystems schematisch dargestellt. In der Mobilstation und in der Referenzstation werden baugleiche GPS-Empfänger

mit sechs Kanälen zum Empfang des öffentlich zugänglichen C/A-Codes (Coarse/Acquisition-Code) verwendet [94]. Sie sind jeweils über eine serielle RS 232-Schnittstelle mit einem PC verbunden, der als Kontroll- und Anzeigeeinheit dient.

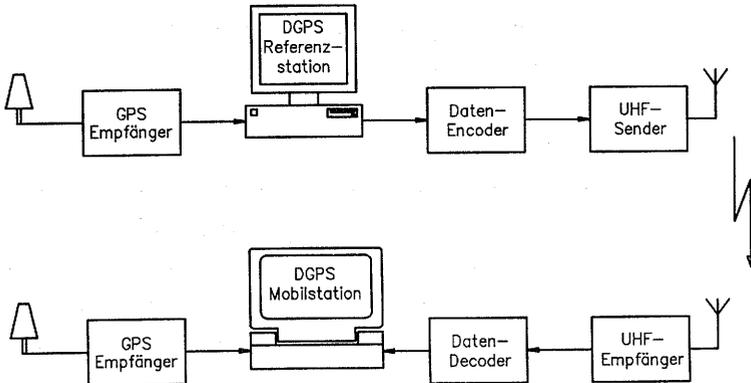


Bild 21: Hardwareaufbau für Realtime-DGPS (Positionskorrekturverfahren)

Die Datenübertragung erfolgt in ASCII-Datensätzen in dem für GPS-Empfänger standardisierten NMEA-0183 Format. Die Übertragungsrate beträgt 4800 baud. In den Datensätzen werden die berechneten Koordinaten (Längengrad, Breitengrad, Höhe) im World Geodetic System 1984 (WGS84), die aktuelle Uhrzeit sowie die Fahrgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag mit einer Aktualisierungsrate von 1 s übermittelt. Außerdem werden aus den Datensätzen die zur Positionsrechnung verwendeten Satelliten und Angaben über die durch die aktuelle Satellitenkonstellation vorgegebene Abweichung der Positionsrechnung, die DOP-Werte (Dilution of Precision), kopiert und gespeichert. Die anderen übertragenen Daten, die Informationen über die einzelnen Satelliten und das gesamte System enthalten (Ephemeriden- und Almanachdaten), sind für die weiteren Berechnungen nicht relevant. Sie werden zur Reduzierung des Speicherplatzbedarfs deshalb nicht aufgezeichnet.

Die verwendeten GPS-Empfänger bieten dem Bediener die Möglichkeit, die Positionsrechnung zu beeinflussen. So läßt sich der Berechnungsalgorithmus (Kalman-Filter) durch die Eingabe einer maximal erreichbaren Beschleunigung an die

Dynamik des zu ortenden Fahrzeugs anpassen. Bestimmte Satelliten können durch die Vorgabe eines minimalen Elevationswinkels oder durch Markieren der Satellitennummer aus der Positionsberechnung ausgeschlossen werden. Durch die letztgenannten Optionen kann auch bei Unterschieden in den Empfangsbedingungen erreicht werden, daß sowohl von der Referenz- als auch von der Mobilstation dieselben Satelliten empfangen werden.

Auf dem PC der DGPS-Referenzstation werden nach dem beschriebenen Positionskorrekturverfahren Korrekturdaten für die Koordinaten Längengrad, Breitengrad und Höhe sowie Fahrgeschwindigkeit nach Richtung und Betrag berechnet und mit dem Zeitpunkt der Positionsbestimmung, den zur Berechnung verwendeten Satelliten und den DOP-Werten gespeichert. Gleichzeitig werden diese Daten über eine weitere RS 232-Schnittstelle als ASCII-Datensatz mit einer Übertragungsrate von 4800 baud an einen Daten-Encoder geschickt und in codierter Form über einen UHF-Sender (459,53 MHz) als Funksignal ausgesendet. Die Strahlungsleistung des eingesetzten Senders beträgt 2 Watt, womit bei Sichtverbindung zwischen Sende- und Empfangsantenne Daten über eine Entfernung von 5 km übertragen werden können.

Von dem auf dem Mähdrescher installierten UHF-Empfänger wird das empfangene Funksignal an einen Daten-Decoder geleitet und wieder in einen ASCII-Datensatz umgewandelt. Die empfangenen Korrekturdaten werden vom PC der DGPS-Mobilstation zeitgleich mit den vom GPS-Empfänger berechneten Daten ebenfalls über eine RS 232-Schnittstelle mit einer Übertragungsrate von 4800 baud eingelesen. Bedingt durch die Korrekturdatenberechnung in der Referenzstation und den Datentransfer sind die übertragenen Korrekturdaten eine Sekunde älter als die Positionsdaten des GPS-Empfängers.

Vor der differentiellen Berechnung wird kontrolliert, ob die Positionsberechnungen auf beiden GPS-Empfängern mit verschiedenen Satelliten durchgeführt worden sind und ob die Korrekturdaten z.B. durch einen Ausfall der Referenzstation oder Fehler in der Datenübertragung ein vorgegebenes Alter überschreiten. Bei Nichterfüllen dieser Ausschlußkriterien werden die von der Referenz-

station berechneten absoluten Positionsfehler für Längengrad, Breitengrad und Höhe von den berechneten Positionsdaten des Empfängers der Mobilstation subtrahiert.

Die Korrektur der Fahrgeschwindigkeit nach Betrag v_F und Richtungswinkel γ_F wird entsprechend **Bild 22** nach **Gl. (11)** durchgeführt.

$$v_F = \sqrt{v_M^2 + v_R^2 - 2 \cdot v_M \cdot v_R \cdot \cos(\gamma_M - \gamma_R)}$$
$$\gamma_F = \arccos\left(\frac{v_M \cdot \cos\gamma_M - v_R \cdot \cos\gamma_R}{v_F}\right)$$

(11)

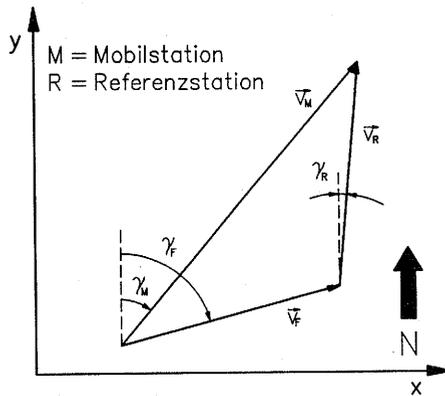


Bild 22: Korrektur der Fahrgeschwindigkeit

Die korrigierten Daten werden entsprechend der Aktualisierungsrate bei der Positionsberechnung (1 Hz) auf dem PC der Mobilstation gespeichert. Durch die zusätzliche Speicherung der ohne Korrekturdaten berechneten Ortungsergebnisse (stand-alone Betrieb) wird es ermöglicht, den durch die Korrekturdatenberechnung und -übertragung hervorgerufenen Zeitversatz in einer Postprocessing-Korrektur auszuschalten.

4.3 Bestimmung des Korndurchsatzes

Die in dieser Arbeit untersuchte Korndurchsatzmeßeinrichtung basiert auf dem in **Bild 23** dargestellten volumetrischen Meßverfahren [39,95].

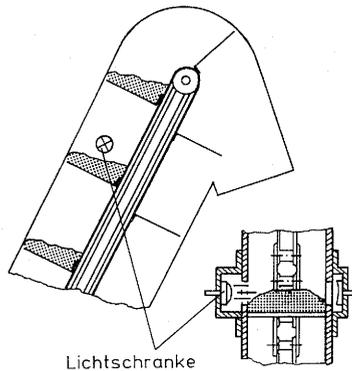


Bild 23: Lichtschranke zur Erfassung des Kornvolumenstroms im Kornelevator nach Diekhans [39]

Vorteile dieses Meßverfahrens sind der einfache und kostengünstige Aufbau sowie die berührungslose Arbeitsweise, so daß der Gutfluß durch die Messung nicht beeinflusst wird. Neben dem allgemeinen Nachteil aller volumetrischen Durchsatzmeßverfahren, daß zur Berechnung des Kornmassenstroms die Korndichte regelmäßig bestimmt werden muß, werden die Meßsignale (Dunkelzeiten) bei dem beschriebenen Verfahren nicht nur durch die Beladungshöhe sondern auch durch die Verteilung des Gutes auf den Elevatorpaddeln beeinflusst.

Zur Steigerung der Meßgenauigkeit und zur Entlastung des Mähdrescherfahrers wurden eine automatisierte Korndichtemeßeinrichtung, deren Meßwerte gemeinsam mit denen der Volumenstrommeßeinrichtung ausgewertet werden, und ein Verfahren zur Kompensation des Einflusses der Gutverteilung auf die Volumestrommessung entwickelt. Um den berechneten Massendurchsatz auf einen einheitlichen Kornfeuchtegehalt beziehen zu können, wurde auch eine Kornfeuchtemeßeinrichtung in die Korndurchsatzmessung einbezogen.

4.3.1 Korndichtemessung

Zur automatisierten Korndichtemessung auf dem fahrenden Mähdrescher wurde ein Probenentnahmegerät entwickelt, in das ein von Böttinger [96] vorgestelltes Wägesystem integriert wurde, **Bild 24**.

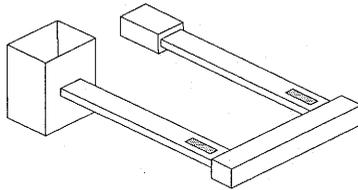


Bild 24: Wägesystem der Korndichtemeßeinrichtung nach [96]

Der Meßzyklus, der zur Bestimmung der Korndichte periodisch durchlaufen wird, ist in **Bild 25** schematisch dargestellt.

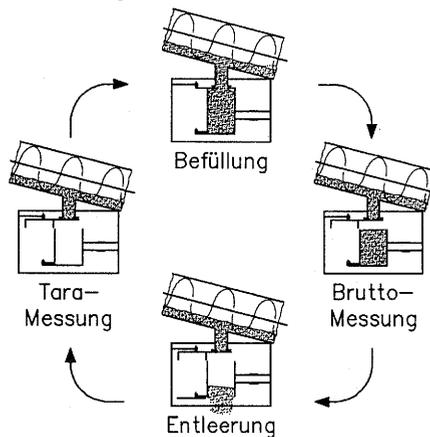
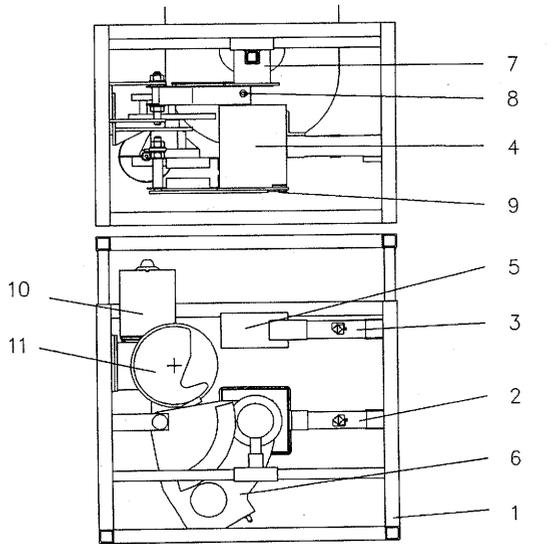
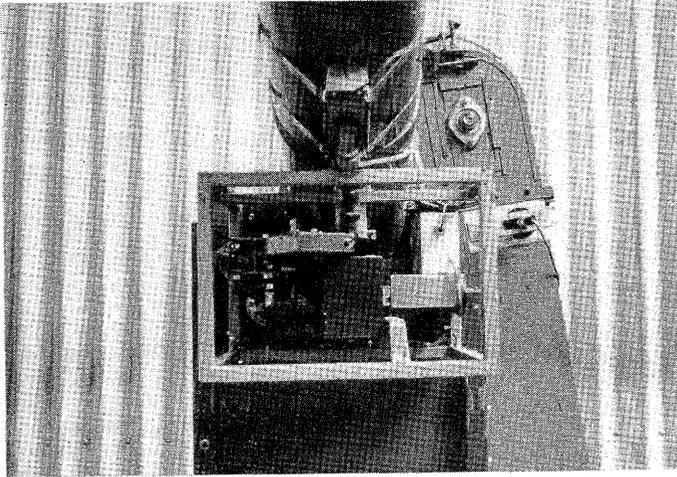


Bild 25: Meßzyklus der Korndichtemeßeinrichtung

Bild 26 zeigt den konstruktiven Aufbau der Korndichtemeßeinrichtung. Das Wägesystem und die Baugruppen des Probenentnahmegerätes werden von einem Geräterahmen (1) aufgenommen, der auf dem Mähdrescher an der Korntankwand unterhalb der Korntankbefüllschnecke mit Blechen verkleidet montiert wird.



- | | | | |
|-----|-------------------|----|------------------|
| 1 | Geräterahmen | 7 | Befüllstutzen |
| 2,3 | Wägezellen | 8 | Füllstandssensor |
| 4 | Probenbehälter | 9 | Behälterboden |
| 5 | Referenzmasse | 10 | Elektromotor |
| 6 | Befülleinrichtung | 11 | Kurvenscheibe |

Bild 26: Vorderansicht und konstruktiver Aufbau der Korndichtemeßeinrichtung

Die Wägeeinrichtung des Meßgerätes besteht aus zwei baugleichen mit Dehnungsmeßstreifen beklebten Doppelbiegebalken-Wägezellen (2,3). An der einen Wägezelle ist der Probenbehälter (4) mit definiertem Volumen angebracht, an der anderen eine Referenzmasse (5).

Zur **Befüllung** des Probenbehälters wird eine Öffnung in der Befülleinrichtung (6) freigegeben, so daß ein Teil des Gutstroms aus der Korntankbefüllschnecke über den Befüllstutzen (7) in den Probenbehälter fließen kann. Über eine in der Befülleinrichtung angebrachte Einweg-Lichtschranke (8) wird der Füllstand kontrolliert. Signalisiert diese die vollständige Befüllung des Behälters, wird die Öffnung durch eine Drehung der Befülleinrichtung verschlossen. Dabei wird gleichzeitig das über den Behälterrand ragende Gut abgestrichen, so daß während der **Bruttomessung** ein definiertes Volumen im Probenbehälter vorliegt. Die **Entleerung** des Probenbehälterinhalts in den Korntank erfolgt durch Drehung des Behälterbodens (9). Bevor die nächste Befüllung stattfindet, wird die **Taramessung** durchgeführt, in der der geleerte Behälter gewogen wird.

Die Befülleinrichtung (6) und der Behälterboden (9) werden durch Federn verschlossen und von einem 12 Volt-Gleichstrommotor (10) über eine Kurvenscheibe (11) geöffnet. Die Konstruktion der Kurvenscheibe ist so ausgelegt, daß während der Brutto- und der Taramessung die korrekte Einleitung der Gewichtskraft des Probenbehälters in die Wägezelle gewährleistet ist.

Der Aufbau der Steuerung und der Meßwerterfassung für die Dichtemeßeinrichtung ist in **Bild 27** dargestellt.

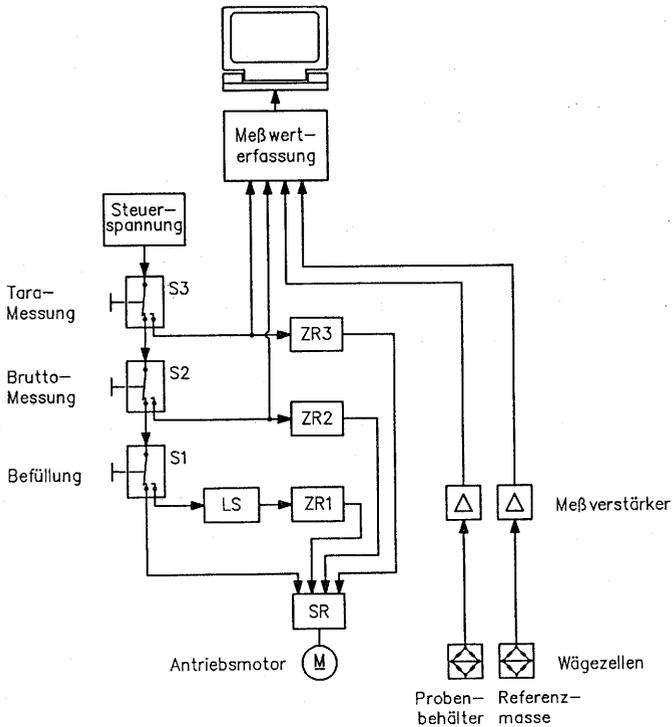


Bild 27: Steuerung und Meßwert-erfassung der Korndichtemeßeinrichtung

Um einen Meßzyklus vollständig zu durchlaufen, rotiert die Kurvenscheibe um 360°. Während der Befüllung, der Bruttomessung und der Taramessung wird der Antriebsmotor über das Steuerrelais SR angehalten, indem entsprechende Schalter (S1, S2, S3) durch einen Nocken auf der Kurvenscheibe betätigt werden. Beim Auslösen der Befüllphase durch den Schalter S1 wird das Steuersignal auf den Eingang der Lichtschranke LS zur Füllstandskontrolle geleitet. Wenn der Probenbehälter vollständig gefüllt ist, schaltet die Lichtschranke durch und aktiviert das Zeitrelais ZR1. Über die Einstellung der Anlaufverzögerung des Zeitrelais ZR1 kann ein Intervall, in dem das Gut im Probenbehälter durch die Vibration der Fördererlemente zusätzlich verdichtet wird, festgelegt werden. Nach Ablauf der Anlaufverzögerung wird die Kurvenscheibe wieder über den Motor angetrieben, bis die Bruttomeßphase erreicht ist. Die Zeitrelais ZR2 und

ZR3 zur Einstellung der Dauer der Brutto- und Taramessphase werden direkt durch die entsprechenden Schalter S2 und S3 aktiviert. Die Signalverstärkung der Meßbrücken-Ausgangsspannungen erfolgt für die Wägezellen des Probenbehälters und der Referenzmasse getrennt. Die verstärkten Signale werden an den A/D-Wandler der Meßwerterfassungskarte geleitet und vom Meßwerterfassungsrechner zyklisch abgefragt. Gleichzeitig werden die Schaltzustände der Schalter S2 und S3 erfaßt, um so zu unterscheiden, ob sich das Gerät in der Bruttomeßphase oder der Taramessphase befindet. In diesen Meßphasen werden aus den Meßwerten des Probenbehälters und der Referenzmasse zur Kompensation der auf die Meßeinrichtung wirkenden Schwingungen die Mittelwerte gebildet. Erst wenn der Meßzyklus vollständig durchlaufen worden ist, wird die Korndichte ρ_K aus dem Quotienten von Probenmasse m_P und dem Behältervolumen V_B berechnet. Der vereinfachte Programmablauf zur Korndichteberechnung ist in **Bild 28** dargestellt.

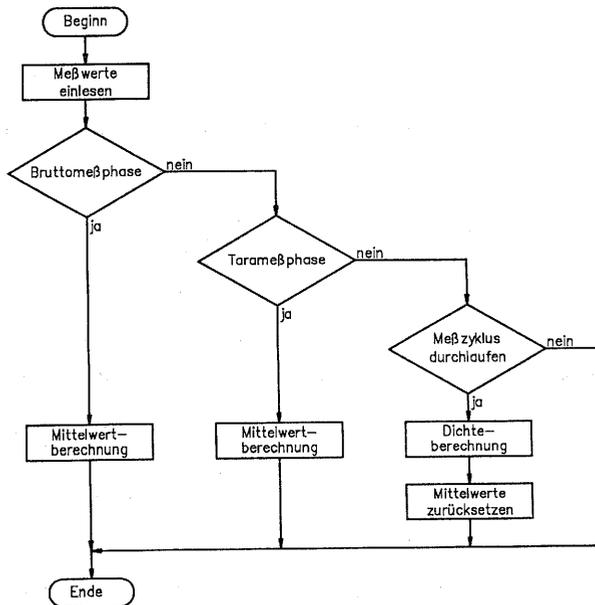


Bild 28: Vereinfachter Programmablauf zur Korndichteberechnung

Da bei Neigung der Meßeinrichtung nicht die gesamte Gewichtskraft des Probenbehälters über die Dehnungsmeßstreifen der Wägezelle erfaßt wird, würden die Meßwerte für die Probenmasse m_p beim Hangeinsatz des Mähdreschers zu niedrig ausfallen. Der Neigungseinfluß auf die Wägeeinrichtung wird durch die Referenzmasse kompensiert. Dazu wird die tatsächliche Referenzmasse m_R mit der von der Wägezelle erfaßten Masse m'_R verglichen. Auf die Referenzmasse und auf die Masse des Probenbehälters m_B wirkt die gleiche Neigung, somit gilt:

$$\frac{m'_B}{m_B} = \frac{m'_R}{m_R} \quad (12)$$

In der Bruttomeßphase wird die Wägezelle durch die Probenbehältermasse m_B und die Kornprobenmasse m_p belastet.

$$m'_{B,Brutto} = (m_B + m_p) \cdot \frac{m'_{R,Brutto}}{m_R} \quad (13)$$

In der Taramessphase wird die Wägezelle nur durch die Probenbehältermasse belastet.

$$m'_{B,Tara} = m_B \cdot \frac{m'_{R,Tara}}{m_R} \quad (14)$$

Für die Differenz der Meßwerte von Brutto- und Taramessphase gilt somit:

$$m'_{B,Brutto} - m'_{B,Tara} = (m_B + m_p) \cdot \frac{m'_{R,Brutto}}{m_R} - m_B \cdot \frac{m'_{R,Tara}}{m_R} \quad (15)$$

Damit ergibt sich die Berechnungsgleichung für die Probenmasse zu:

$$m_p = (m'_{B,Brutto} - m'_{B,Tara}) \cdot \frac{m_R}{m'_{R,Brutto}} - m_B \cdot \left(1 - \frac{m'_{R,Tara}}{m'_{R,Brutto}}\right) \quad (16)$$

4.3.2 Kornvolumenstrommessung

Zur Bestimmung des Kornvolumenstroms wurde das in Bild 23 dargestellte Meßverfahren erweitert, indem drei Lichtschranken im Kornelevator angeordnet wurden, **Bild 29**.

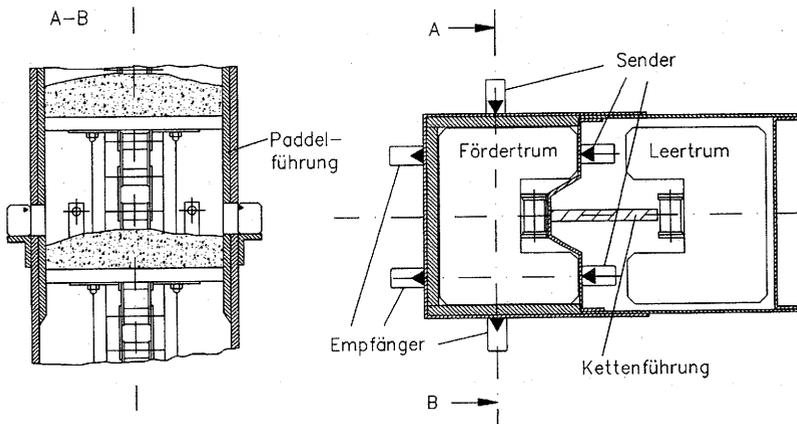
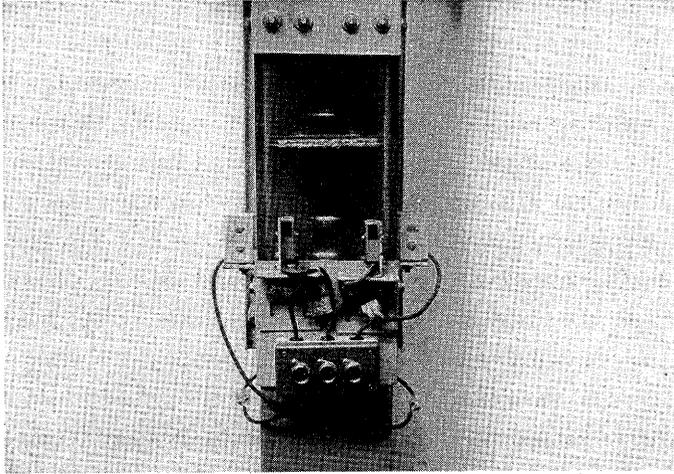


Bild 29: Kornvolumenstrommeßeinrichtung mit drei Lichtschranken

Durch den Einsatz der zwei zusätzlichen Lichtschranken soll die Verteilung des Guts auf den Elevatorpaddeln im Meßergebnis berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu den Untersuchungen von Pfeiffer u.a [55], in denen eine Lichtquelle und vier gegenüberliegende Photodioden verwendet wurden, läßt sich die Verteilung des Guts auf den Elevatorpaddeln bei der in Bild 29 dargestellten Anordnung in Schicht- und in Falllinie erfassen. Der Einbau weiterer Lichtschranken in den Elevator wird durch die Lage der Elevatorkette behindert.

Verwendet werden aus Sender- und Empfängereinheit bestehende Lichtschranken. Die außerhalb des Elevators angebrachten Empfangseinheiten lassen sich zur Ausrichtung in Langlöchern sowohl horizontal als auch vertikal verschieben. Im Fördertrum des Elevators ist eine strahlendurchlässige Paddelführung aus Plexiglas angebracht, durch die der Spalt zwischen Paddel und Elevatorwand im Bereich der Lichtschranken möglichst gering gehalten wird. Hiermit wird vermieden, daß die Dunkelzeitmessungen durch herabrieselndes Gut beeinträchtigt werden. Die Verwendung von Plexiglas als Paddelführung ermöglicht es, den Fördervorgang im Elevator mit Hilfe eines Stroboskops zu beobachten und Hochgeschwindigkeitsaufnahmen anzufertigen. Eine Kettenführung im Leertrum sorgt dafür, daß die Paddeln die dort montierten Sendeeinheiten nicht beschädigen.

Der meßtechnische Aufbau zur Bestimmung der Lichtschranken-Dunkelzeiten ist im **Bild 30** vereinfacht dargestellt. Von einem Taktgenerator werden kontinuierlich Impulse in einer konstanten Frequenz von 10000 Hz erzeugt und liegen am Eingang der Zähler an. Der Impulsgenerator und die Zähler sind Bauteile eines PC-gesteuerten Meßwerterfassungssystems. Die Impulszählung findet nur dann statt, wenn das am Tor des Zählers anliegende TTL-Signal auf dem Wert 'high' steht. Dies Signal wird bei Unterbrechung des Lichtstrahls am Ausgang der dunkelschaltenden Lichtschranke erzeugt. Alle Zähler werden in einer festen Abtastfrequenz von $f_A = 1$ Hz ausgelesen. Die Dunkelzeiten T_{Di} der Lichtschranken ($i = 1,2,3$) werden aus den registrierten Impulsen I_i und dem Verhältnis der Abtastfrequenz f_A zur Frequenz des Taktgenerators f_T nach **Gl.(17)** berechnet.

$$T_{Di} = I_i \cdot \frac{f_A}{f_T} \quad (17)$$

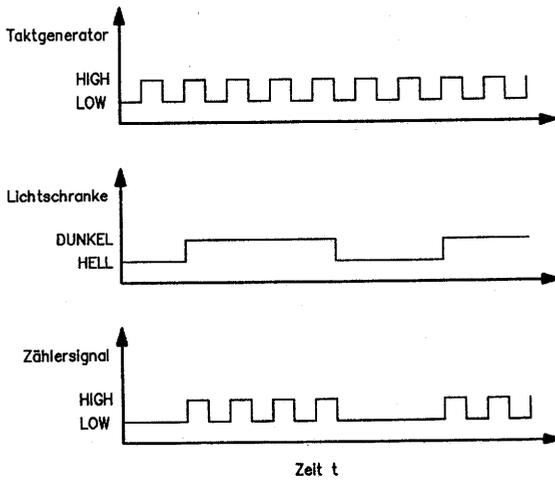
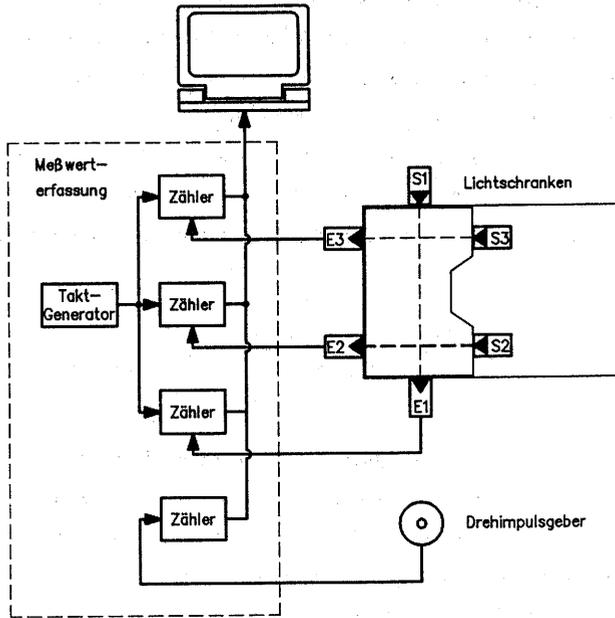


Bild 30: Messung der Lichtschranken-Dunkelzeiten

Damit der systembedingte Zählfehler beim Öffnen und Schließen des Zählertors möglichst gering gehalten wird, wird der Taktgenerator mit einer hohen Frequenz betrieben. Da die Förderleistung des Elevators proportional zu dessen Kettengeschwindigkeit ist, bewirkt ein Abfallen der Kettengeschwindigkeit bei konstantem Volumenstrom eine Erhöhung des auf den Paddeln geförderten Gutvolumens und somit eine höhere Dunkelzeit. Wird die Volumenstrommeßeinrichtung bei Nenndrehzahl des Antriebs kalibriert, müssen Drehzahländerungen, wie sie z.B. bei hohen Durchsätzen oder bei der Ernte am Hang mit vollen Korntank auftreten können, in die Dunkelzeitberechnung miteinbezogen werden.

$$T'_{Di} = T_{Di} \cdot \frac{v_{EI}}{v_{EI,nenn}} = T_{Di} \cdot \frac{n_{EI}}{n_{EI,nenn}} \quad (18)$$

Bestimmen läßt sich die Kettengeschwindigkeit über die Frequenz, mit der die Paddeln die Lichtschranken passieren. Hierzu sind die Schaltvorgänge von Hell- auf Dunkelschaltung zu zählen. In den Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurde zur Messung der Kettengeschwindigkeit ein an der Elevatorantriebswelle montierter inkrementaler Drehimpulsgeber eingesetzt, dessen Signale an einen weiteren Zähler geleitet werden. Hiermit läßt sich eine höhere Auflösung als durch die Zählung der Paddeldurchläufe erreichen.

4.3.3 Kornfeuchtemessung

Zur kontinuierlichen Messung des Kornfeuchtegehalts während des Erntevorgangs wird ein speziell für den Mähreschereinsatz entwickeltes Feuchte-meßgerät verwendet [97]. Das Gerät besteht aus der Sensoreinheit, die in die Korn-tankbefüllschnecke eingebaut wird, und einer Kontrolleinheit mit LCD-Anzeige, die im Blickfeld des Fahrers in der Kabine befestigt werden, **Bild 31**.

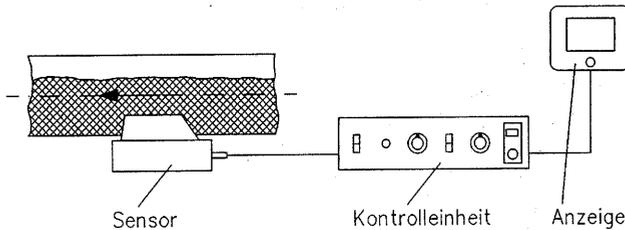


Bild 31: Kapazitive Meßeinrichtung zur kontinuierlichen Bestimmung des Kornfeuchtegehalts

Zum Einbau des Sensors wurde nach Herstellerangaben ein Teil der Schneckenwindung entfernt, um dadurch zu gewährleisten, daß der Sensor immer vollständig mit Gut bedeckt ist. Die Sensoreinheit besteht aus einem Meßkondensator und einem Temperaturfühler, so daß sich neben dem Feuchtegehalt wahlweise auch die Temperatur des Ernteguts anzeigen läßt. Zur Aufzeichnung der Feuchte-meßwerte wurde die an die Anzeigeeinheit geleitete analoge Ausgangsspannung an einen A/D-Wandler des Meßwerterfassungssystems weitergeleitet. Das Meßverfahren basiert auf der Änderung der dielektrischen Eigenschaften des Ernteguts in Abhängigkeit von dessen Feuchtegehalt. Änderungen in der Temperatur, der chemischen Zusammensetzung und der Dichte des Ernteguts wirken deshalb als Störgrößen, von denen lediglich die Temperatur gemessen und kompensiert wird. Nach Herstellerangaben soll die Meßeinrichtung beim Wechseln der Gutart neu kalibriert werden. Dazu muß der Feuchtegehalt durch ein stationäres Referenzverfahren, z.B. Trockenschrankmethode oder eichfähige Schnellfeuchtemessung, bestimmt und die Ausgangsspannung durch Verändern des Offsets mit der Referenzmessung abgeglichen werden.

4.4 Weg-/Geschwindigkeitsmessung

Zur schlupffreien Geschwindigkeitsmessung wurden Radar-Geschwindigkeits-sensoren eingesetzt. Diese in der Landtechnik bereits vielfach genutzten Sensoren arbeiten nach dem Doppler-Effekt mit elektromagnetischen Wellen. **Bild 32** zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Radar-Geschwindigkeitssensors. Eine eingehende Beschreibung des Aufbaus und der Funktion der Sensoren sowie deren physikalische Grundlagen sind z.B. in [98] zu finden.

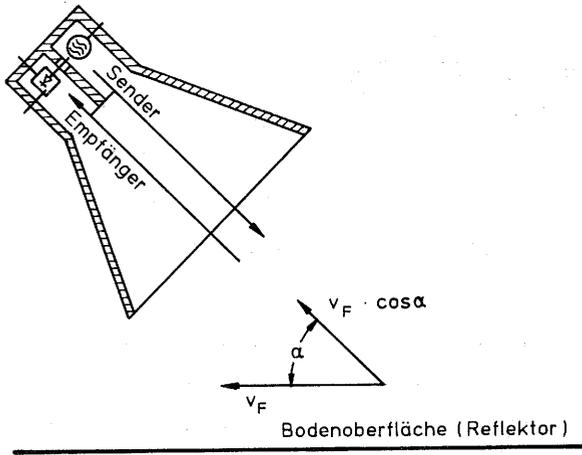


Bild 32: Aufbau eines Radar-Geschwindigkeitssensors nach [98]

Das der Fahrgeschwindigkeit v_F proportionale Meßsignal ist die Dopplerfrequenz $\Delta\nu$. Sie ist von der Grundfrequenz ν_0 , der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c und vom Abstrahlwinkel α abhängig.

$$\Delta\nu = 2 \cdot \nu_0 \cdot \frac{v_F \cdot \cos \alpha}{c} \quad (19)$$

Durch Integration der Dopplerfrequenz über der Zeit erhält man eine dem zurückgelegten Weg proportionale Impulsrate als Ausgabesignal. Die Ausgabesignale werden einem Zähler zugeführt, der mit einer festen Abtastrate ausgelesen wird. Da die Radarsensoren nicht zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfahrt unterschei-

den, wurde auf dem Versuchsmähdrescher am Bedienhebel des Fahrtriebs ein Schalter angebracht, mit dem die Meßwerte bei Rückwärtsfahrt invertiert werden.

Um die Fahrgeschwindigkeit nach Betrag und Richtung zu bestimmen, werden zwei baugleiche Radarsensoren [99] verwendet, die unter der Vorderachse des Mähdreschers im gleichen Abstand von der Fahrzeuglängsachse montiert sind. Der Abstrahlwinkel beträgt 35° entgegen der Fahrtrichtung. Zur Berechnung des Fahrgeschwindigkeitsbetrags wird der Mittelwert beider Meßsignale gebildet. Die Fahrtrichtungsänderung läßt sich aus der Differenz der Meßsignale berechnen.

Für den Einsatz am Ackerschlepper wird empfohlen, die Radarsensoren in der Fahrspur zu montieren. Im Gegensatz dazu werden die Sensoren beim Mähdrescher unter der Vorderachse angebracht. Dort werden die Messungen am geringsten durch Störeinflüsse von bewegten Halmen beeinträchtigt, da die Ausbreitungskeulen normalerweise auf eine gleichmäßige Stoppelfläche gerichtet sind. Bei der Montage ist auch darauf zu achten, daß eine Übertragung von Schwingungen der Maschine auf die Sensoren, die ebenfalls eine das Meßergebnis verfälschende Relativbewegung darstellen, ggf. durch eine Entkopplung vermieden wird.

Wie Vorversuche zeigten, ist neben den in Gl.(19) aufgeführten Einflußgrößen auch eine Abhängigkeit der Meßergebnisse von der Beschaffenheit der Bodenoberfläche festzustellen, die auf veränderte Reflexionsverhältnisse zurückzuführen ist. Die Kalibrierung der Radarsensoren sollte deshalb auf der entsprechenden Erntefläche durchgeführt werden. Nicht zu vermeiden sind aber Unterschiede in den Reflexionsverhältnissen beider Sensoren, wie sie z.B. in Fahrgassen auftreten. Diese werden als Fahrtrichtungsänderung interpretiert und stellen somit eine wesentliche Fehlerquelle des Verfahrens dar.

Als Alternative zu den Radarsensoren wird im Rahmen dieser Arbeit auch das über DGPS berechnete Geschwindigkeitssignal ausgewertet. Ein Vergleich beider Verfahren ist in Kap. 5.3 zu finden.

4.5 Schnittbreitenmessung

Zur berührungslosen Bestimmung der tatsächlichen Schnittbreite wurden Ultraschall-Abstandssensoren in beide Halbteiler des Schneidwerks eingebaut, wie in Bild 10 dargestellt. Der Aufbau der Sensoren ist in **Bild 33** schematisch dargestellt. Eine eingehende Beschreibung der Abstandsmessung nach dem Ultraschall-Laufzeit-Verfahren ist z.B. [100] zu entnehmen.

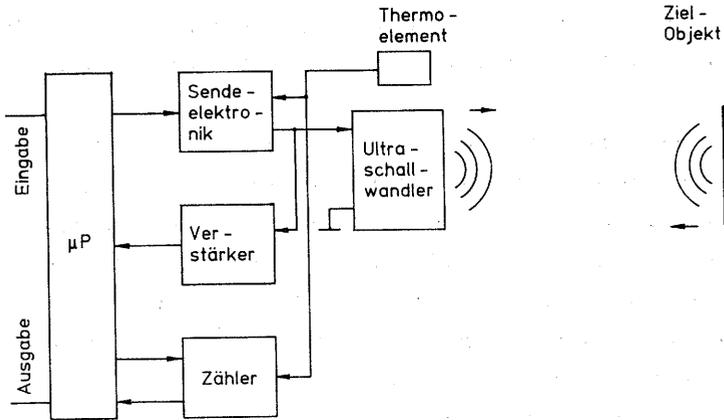


Bild 33: Aufbau eines Ultraschall-Abstandssensors nach [101]

Verwendet werden Sensoren mit einem piezoelektrischen Ultraschallwandler, der sowohl zum Senden als auch zum Empfangen genutzt wird. Die Frequenz der erzeugten Ultraschallschwingungen beträgt 215 kHz. Ein Mikroprozessor steuert die Sendelektro-nik an, identifiziert das empfangene Signal, mißt dessen Laufzeit und berechnet daraus die Entfernung zum Zielobjekt. Die Dauer für einen Meßzyklus hängt von der Objektentfernung ab und beträgt nach Herstellerangaben 16 bis 33 ms [101]. Da die Resonanzfrequenz des Schallwandlers temperaturabhängig ist, wird sie über ein Thermo-element nachgeregelt. Durch die Anpassung der Taktfrequenz des Zählers wird auch die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur berücksichtigt. Eine eingebaute Puls-codierung und gleitende Mittelwertbildung sollen die Störsicherheit erhöhen und die Stabilität der Meßergebnisse gewährleisten. Als Meßsignal wird eine ab-

standsproportionale Ausgabespannung an einen A/D-Wandler des Meßwerfassungssystems geleitet, der mit einer Abtastfrequenz von 50 Hz ausgelesen wird.

Die Entfernung zwischen dem Sensor und dem Zielobjekt wird nach **Bild 34** in drei Bereiche unterteilt.

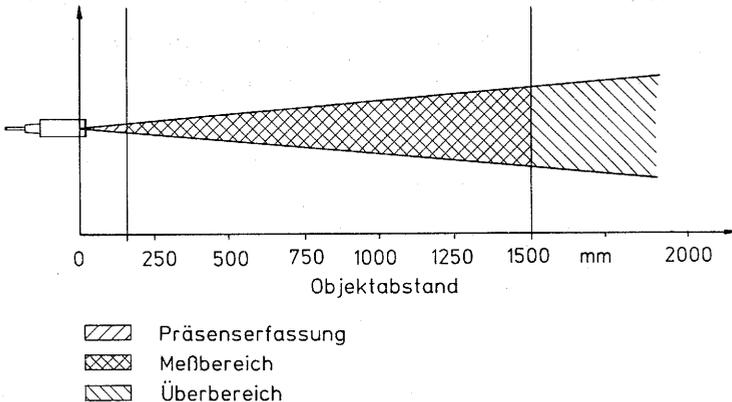


Bild 34: Entfernungsbereiche des Ultraschall-Abstandssensors

Nach den Geräteinformationen des Herstellers beginnt der durch eine Schallkeule mit einem Öffnungswinkel von 10° begrenzte Meßbereich bei 150 mm und endet bei 1500 mm. Die angegebene Auflösung beträgt 1 mm und liegt somit weit unter dem minimalen Reihenabstand für Getreide (ca. 100 mm), der die Auflösung der Schnittbreitenmessung im Feldeinsatz begrenzt. Unterhalb des Meßbereichs findet lediglich eine Präsenzerfassung statt, da Mehrfachechos in diesem Bereich zu Fehlsignalen führen können. Bei Überschreitung des Meßbereichs (Überbereich) sind die Echos des Zielobjektes zu schwach, um vom Sensor erkannt zu werden.

Um außerhalb des Meßbereichs der Ultraschall-Abstandssensoren festzustellen, ob sich der Mähdrescher innerhalb oder außerhalb des Bestandes befindet, wurde eine Lichtschranke parallel zu den Sensoren in die Halmteiler eingebaut.

4.6 Versuchsmähdrescher

Als Versuchsmähdrescher wurde ein konventioneller Mähdrescher mit einer Dreschtrommelbreite von 1,1 m und einer Schneidwerksbreite von 3,6 m verwendet¹. Im Bild 35 sind die Einbauorte der zur Ertragskartierung genutzten Meßeinrichtungen schematisch dargestellt. Neben den in diesem Kapitel beschriebenen Meßeinrichtungen zur Bestimmung von Position, Korndurchsatz und Flächenleistung verfügt der Versuchsmähdrescher über handelsübliche Kornverlustsensoren am Ausgang des Schüttlers und der Reinigungsanlage.

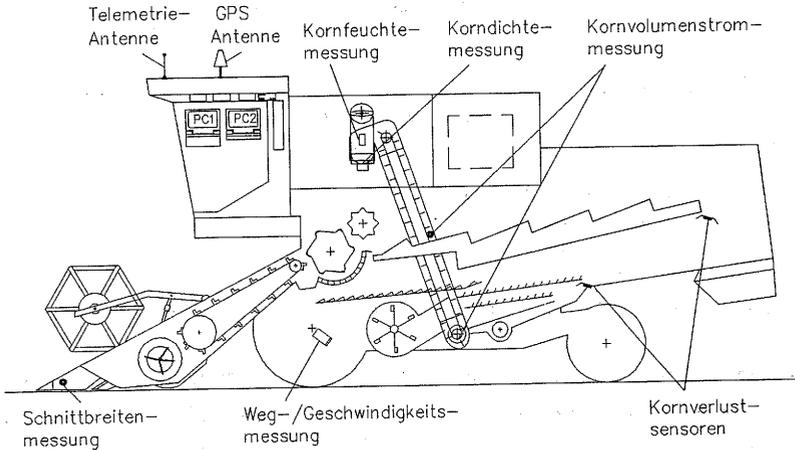


Bild 35: Versuchsmähdrescher mit Meßeinrichtungen für die Ertragskartierung

Der Meßsignalfluß und die Meßdatenverarbeitung auf dem Versuchsmähdrescher sind im Bild 36 schematisch dargestellt. Die Zählerbausteine, A/D-Wandler und RS 232-Schnittstellen sind als Interface-Steckkarten im Meßwert-erfassungsrechner PC1 (CPU 386SX, 16 MHz) installiert. Der PC1 übernimmt außerdem die DGPS-Positionskorrektur und die Steuerung der Programmabläufe zur Berechnung der Meßgrößen Kornvolumenstrom, Korndichte, Kornfeuchte, Fahrgeschwindigkeit und Schnittbreite. Die Meßsignale der Kornverlustsensoren dienen lediglich zur Abschätzung der Verluste.

¹ Der Versuchsmähdrescher wurde freundlicherweise von der Firma Deutz-Fahr-Erntesysteme GmbH/Lauringen zur Verfügung gestellt. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Zur Ertragskartierung werden die aktuellen Daten der Meßeinrichtungen einmal pro Sekunde im Arbeitsspeicher des PC1 abgelegt und gleichzeitig an den Datenverarbeitungsrechner PC2 (CPU 486DX, 33 MHz) übertragen, auf dem die Software zur online-Ertragskartierung und -vorausberechnung implementiert ist. Ein Multitaskingtreiber in der Meßwerterfassungssoftware ermöglicht es, die Prozesse quasi parallel durchzuführen [102]. Beim gleichzeitigen Betrieb aller Meßeinrichtungen wird die Abtastfrequenz bedingt durch die Prozessorleistung des PC1 auf 50 Hz begrenzt.

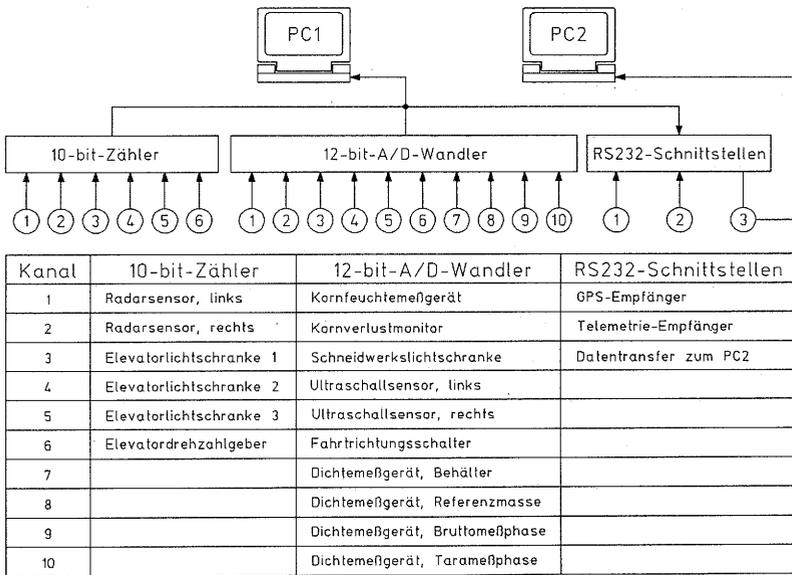


Bild 36: Schematische Darstellung des Meßsignalflusses und der Meßdatenverarbeitung auf dem Versuchsmähdrescher

Während der Feldversuche können Daten über eine Meßdauer von bis zu 45 Minuten im Arbeitsspeicher des PC 1 aufgezeichnet werden. Anschließend werden sie auf Diskette gespeichert und können als Echtzeitverläufe dargestellt werden. Die Software zur Ertragskartierung und Ertragsvorausberechnung gestattet es, diese Daten auch im Postprocessing zu verarbeiten.

5 Untersuchungen zum Einsatzverhalten der Meßeinrichtungen

In den im folgenden beschriebenen Labor- und Feldversuchen wurden die zur Ertragskartierung eingesetzten Meßeinrichtungen separat untersucht, um deren Einsatzverhalten unter verschiedenen in der Ernte auftretenden Betriebsbedingungen zu ermitteln. Die durchgeführten Untersuchungen dienten außerdem zur Kalibrierung der Meßeinrichtungen, zur Optimierung ihrer Einstellparameter und zur Bewertung ihrer Eignung für den Einsatz auf dem Mährescher in Hinsicht auf Funktionssicherheit und Meßabweichungen.

5.1 Positionsbestimmung

5.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Untersuchung der Positionsbestimmung mit GPS wurden in den Jahren 1991 bis 1995 Ortungsfahrten mit dem Versuchsmährescher durchgeführt. Nach den ersten Ortungsfahrten im Jahr 1991, die im 'stand-alone'-Betrieb durchgeführt wurden, wurde 1992 durch den Einsatz einer Referenzstation ein differentielles System mit Positionskorrektur im DGPS-Postprocessing eingerichtet. Dieses wurde 1993 mit einer Datentelemetrieanlage auf Realtime-DGPS erweitert. Ab 1994 war das GPS bereits voll ausgebaut, d.h. alle vorgesehenen 24 Satelliten befanden sich auf ihren Umlaufbahnen. Hierdurch konnten über den gesamten Versuchszeitraum mindestens vier Satelliten für dreidimensionale Positionsberechnungen empfangen werden, sofern keine Abschattungen der Satellitensignale vorlagen.

Da die Strahlungsleistung des UHF-Senders (2 Watt) den Übertragungsbereich der Korrekturdaten-Telemetrieanlage auf ca. 5 km begrenzt, wurde die DGPS-Referenzstation in einem mobilen Labor untergebracht. Während der Feldversuche wurde das mobile Labor in der Nähe der entsprechenden Versuchsflächen aufgestellt. Hierdurch wurde auch gewährleistet, daß die Referenzstation und der mobile GPS-Empfänger annähernd gleiche Empfangsbedingungen haben.

Lagen für den Antennenstandort der Referenzstation keine genauen Koordinaten vor, wurde dessen Position vor Beginn der Versuche über den Mittelwert einer GPS-Langzeitmessung (24 Stunden) bestimmt. Vorversuche zeigten, daß die Positionsabweichung nach diesem Verfahren unter 5 m liegt. Zudem wirkt sie sich lediglich als absolute Abweichung aus, so daß die relative Position des Mähdreschers auf einen Bezugspunkt unbeeinträchtigt bleibt.

Zur Darstellung der Ortungsfahrten ist eine äquidistante Projektion der geographischen WGS84 Koordinaten Längengrad L und Breitengrad B, die sich auf ein Ellipsoid beziehen, in kartesische Koordinaten x und y notwendig. In der Bundesrepublik Deutschland werden im Vermessungswesen vornehmlich Gauß-Krüger Koordinaten verwendet. Für überregionale Anwendungen wird das Universal Transverse Mercator Grid System (UTM) eingesetzt. Da bei einer Transformation der WGS84 Koordinaten in eines der genannten kartesischen Koordinatensysteme das Bezugssystem verlassen wird, werden die Berechnungen sehr komplex und zeitaufwendig [103]. Um zu erreichen, daß die Ortungsfahrten auch in Echtzeit auf dem PC2 des Versuchsmähdreschers dargestellt werden können, wurde ein Transformationsverfahren angewendet, bei dem das Bezugssystem nicht verlassen wird. Ein Vergleich der Ausdrucke von Ortungsfahrten mit einer Ost-West-Ausdehnung bis zu 30 km mit Karten des Landesvermessungsamtes zeigte bei Anwendung des vereinfachten Transformationsverfahrens keine erkennbare Verzerrung.

Die in diesem Kapitel dargestellten Ortungsfahrten wurden auf Flächen der Universität Stuttgart-Hohenheim während der Getreideernten 1994 und 1995 durchgeführt. Es werden die aufgezeichneten Koordinaten des GPS-Antennenmontagepunkts, der sich beim Versuchsmähdrescher über der Mitte der Vorderachse befindet, wiedergegeben. Rechts oben im Textfeld der Darstellungen sind die WGS84 Koordinaten des Darstellungsbereichsmittelpunktes als Breitengrad ($4843.1854 = 48^\circ 43.1854'$) und Längengrad angegeben. Bei der Auswahl der Ortungsfahrten wurde darauf geachtet, daß die Ausdehnung der Versuchsflächen einen Bereich von 300 m nicht überschreitet. Hierdurch können einzelne Fahrspuren in der Darstellung voneinander unterschieden werden.

5.1.2 Ergebnisse

Anhand einer Ortungsfahrt, in der mit dem Versuchsmähdrescher zwei nebeneinanderliegende Reihen eines Versuchsfeldes mit der vollen Schneidwerksbreite von außen nach innen abgeerntet wurden, soll zunächst die Positionsbestimmung mit DGPS dargestellt werden.

Bild 37 zeigt die aus den Pseudoentfernungen zu vier Satelliten im 'stand-alone' Betrieb berechneten Ortungsergebnisse des mobilen GPS-Empfängers. Während der gesamten Versuchsdauer, die einschließlich der Standzeiten 17 Minuten betrug, fand kein Satellitenwechsel statt.

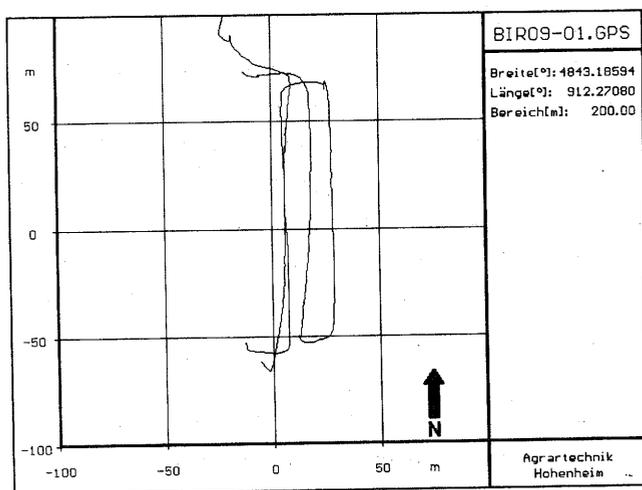


Bild 37: Dynamische Positionsbestimmung mit GPS ('stand-alone' Betrieb), (Stuttgart-Birkach, 01.08.1994)

Bild 38 zeigt die in diesem Zeitraum mit denselben Satelliten berechneten Ortungsergebnisse der stationär aufgestellten Referenzstation.

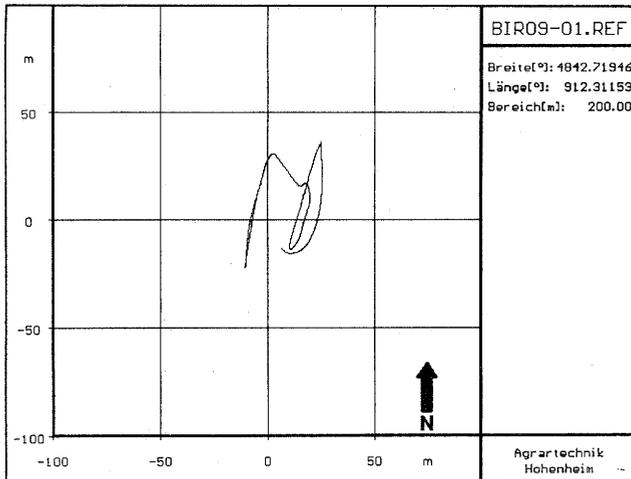


Bild 38: Stationäre Positionsbestimmung mit GPS (Referenzstation), (Stuttgart-Hohenheim, 01.08.1994)

Der Mittelpunkt des Darstellungsbereichs ist auf die vermessene Position der Referenzstation gelegt worden, so daß die Abstände der Ortungsergebnisse vom Mittelpunkt die Abweichungen in der Positionsberechnung für den Beobachtungszeitraum angeben. Über den gesamten Tagesverlauf traten maximale Abweichungen von über 200 m auf, die durch die in Kap. 4.2 genannten Fehlerquellen bei der Positionsbestimmung mit GPS hervorgerufen werden. Den größten Einfluß hierbei hat die künstliche Verfälschung der Satellitensignale über Selective Availability.

Bild 39 zeigt die nach dem Positionskorrekturverfahren im Postprocessing differentiell berechneten Ergebnisse der Ortungsfahrt.

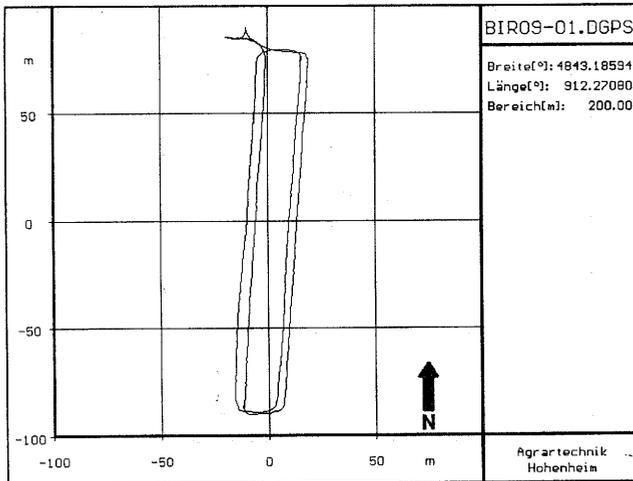


Bild 39: Dynamische Positionsbestimmung mit DGPS nach dem Positionskorrekturverfahren, (Stuttgart-Birkach, 01.08.1994)

Da beide Empfänger über die Versuchsdauer dieselben Satelliten zur Positionsberechnung verwendeten, ließ sich das Positionskorrekturverfahren bei allen Ortungsergebnissen anwenden. Die mit der Referenzstation aufgezeichneten Positionskorrekturdaten wurden dazu zeitsynchron von den Positionsdaten des mobilen Empfängers subtrahiert. Der tatsächliche Fahrkurs wird durch die Positionsberechnung über DGPS sehr gut wiedergegeben, was bei Betrachtung der parallel zueinander verlaufenden Fahrspuren zu erkennen ist. Die Abweichungen konnten bei der dargestellten Ortungsfahrt auf unter 1 m reduziert werden.

Im **Bild 40** sind die über Realtime-DGPS berechneten Ortungsergebnisse für die Ernte eines Getreidefeldes mit einer Fläche von ca. 3 ha dargestellt.

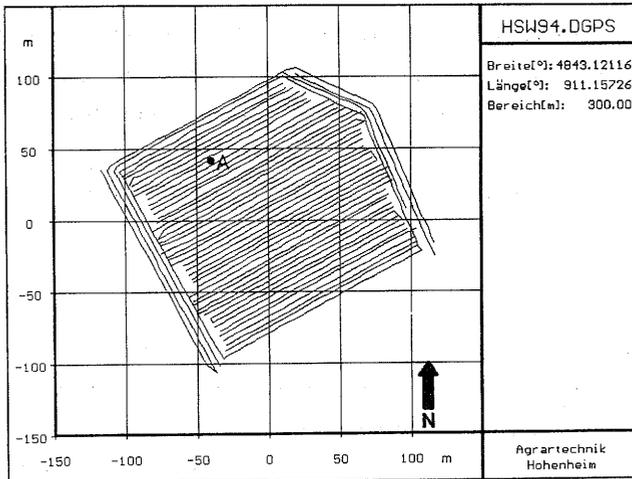


Bild 40: Positionsbestimmung über Realtime-DGPS nach dem Positionskorrekturverfahren, (Stuttgart-Steckfeld, Heidfeldhof, 16.08.1994)

Da jede Teilfläche eines Feldes nur einmal geerntet werden kann, dürfen sich die Fahrspuren des Mähdreschers nur bei Fahrten außerhalb des Bestands überschneiden. Weil die DGPS-Ortungsergebnisse nur dann aufgezeichnet werden, wenn die Ergebnisse der Schnittbreitenmessung innerhalb des Meßbereichs der Ultraschall-Abstandssensoren von 0,8 m liegen (vgl. Kap.5.4.2.2), werden diese Leerfahrten von der Darstellung ausgeschlossen. Gleiches gilt auch für Fahrstrecken innerhalb des Bestands, bei denen der Abstand zwischen einem der Halmteiler und der Bestandskante mehr als 0,8 m beträgt. Dieser Fall trat im nördlichen Feldbereich (Punkt A) bei der Ernte des letzten Bestandstreifens nach etwa einem Drittel der Fahrstrecke auf.

Bei dem dargestellten Feld lagen für den Empfang der Satellitensignale und der Korrekturdaten optimale Bedingungen vor, da es sich um eine ebene Fläche ohne größere Hindernisse in der Umgebung handelt. Für über 99 % der Ortungsergebnisse war die Anwendung des Positionskorrekturverfahrens zulässig. Lediglich in Übergangszeiten von maximal 5 s, in denen Satelliten in den eingestellten Empfangsbereich eintraten oder ihn verließen, wurden von der Referenzstation und dem mobilen Empfänger unterschiedliche Satelliten empfangen, so daß keine differentiellen Ortungsergebnisse berechnet werden konnten. Die Abweichungen aller verbleibenden Ortungsergebnisse liegen unter 2,0 m.

Am Verlauf der Fahrspuren ist zu erkennen, daß das Feld nach dem Freischneiden der Wendeflächen in drei Abschnitten jeweils von außen nach innen im Uhrzeigersinn geerntet wurde. Da der Antennenmontagepunkt beim Versuchsmähdrescher in Richtung der Fahrzeuginnenachse um 3,2 m hinter den Montagepunkten der Ultraschallabstandssensoren liegt, beginnen die aufgezeichneten Fahrspuren beim Einfahren in den Bestand bereits vor der tatsächlichen Bestandskante und enden entsprechend vor dem Verlassen des Bestands. Um eine korrekte Zuordnung der Meßwerte auf die Position der Gutaufnahme zu gewährleisten, werden die Ortungsergebnisse bei der Ertragskartierung (Kap. 6) deshalb nicht auf den Antennenmontagepunkt sondern nach Gl.(2) auf die Position der Mähmessermitte bezogen.

Im Vergleich zu der in Bild 40 dargestellten DGPS-Ortung unter optimalen Empfangsbedingungen zeigt das **Bild 41** die Ergebnisse für ein Feld, das an der nordöstlichen Feldgrenze von hohen Bäumen umsäumt wird. Durch die Bäume wurden Satelliten, die sich nahe am Horizont befanden, für den mobilen Empfänger zeitweise abgeschattet. Die Abschattungen traten in Abhängigkeit von der Position des Mähdreschers und der jeweiligen Satellitenkonstellation unregelmäßig auf. In diesen Zeiten wurden die Positionsberechnungen der Referenzstation und des mobilen Empfängers mit unterschiedlichen Satelliten durchgeführt, so daß eine differentielle Berechnung nach dem Positionskorrekturverfahren für ca. 10 % der Ortungsergebnisse nicht anwendbar war. Diese Ergebnisse wurden von der Darstellung ausgeschlossen.

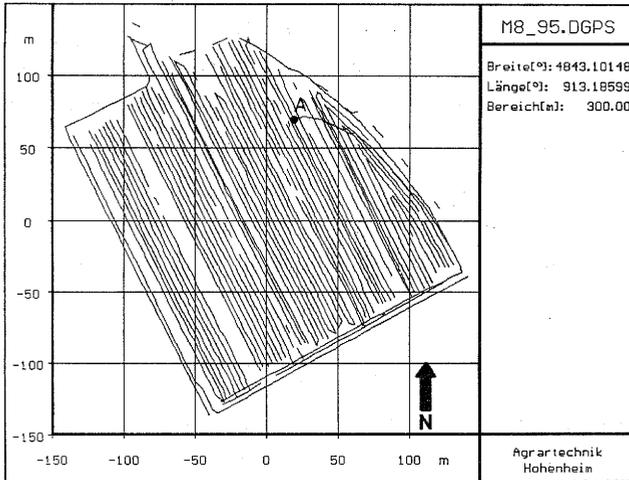


Bild 41: Positionsbestimmung über Realtime-DGPS nach dem Positionskorrekturverfahren, (Stuttgart-Hohenheim, Meiereihof, 02.08.1995)

Beim Einsatz des DGPS-Streckenkorrekturverfahrens treten derartige Ortungsausfälle nicht auf, wenn für alle in die Positionsberechnung einbezogenen Satelliten Streckenkorrekturdaten vorliegen. Unabhängig vom Korrekturverfahren sollte die Updaterate bei der Korrekturdatenübertragung 5 s nicht überschreiten, da die Signalverfälschung durch die Selective Availability laufend geändert wird. Eine Verwendung von Korrekturdaten, die älter als 5 s sind, verursachte bei den durchgeführten Ortungsfahrten zeitweise Abweichungen von mehr als 5 m.

In Bild 41 ist neben Ortungsausfällen im nordöstlichen Feldbereich (Punkt A) eine Fahrspur zu erkennen, die die anderen Fahrspuren kreuzt. Hierbei handelt es sich um eine Fehlmessung, die nach einer Abschattung auftrat. Auf dem Mähdrescher wurden weniger als vier Satelliten empfangen, so daß keine dreidimensionale Positionsberechnung durchgeführt werden konnte. Nach der Abschattung erfolgte die Positionsberechnung zunächst mit einer wesentlich höheren Abweichung, die erst nach einer Dauer von ca. 60 s ihren ursprünglichen Wert wieder erreichte.

Dieses Verhalten wurde auch von Hellebrand u. Beuche [9] beschrieben und ist auf den Positionsberechnungsalgorithmus des GPS-Empfängers zurückzuführen. Während es beim Neustart des Empfängers regelmäßig auftritt, kamen derartig ungünstige Satellitenkonstellationen während der Ortungsfahrten in den Versuchsjahren 1994 und 1995 nur selten und dann in der Nähe hoher Hindernisse am Feldrand vor. Um derartige Fehlmessungen auszuschließen, werden bei der Ertragskartierung (Kap. 6) nur Ortungsergebnisse zugelassen, bei denen die Positionsberechnung mit wenigstens 4 Satelliten mindestens 60 s durchgehend ausgeführt wurde.

Durch die Kombination von DGPS mit einem oder mehreren alternativen Ortungssystemen lassen sich die unabhängig voneinander berechneten Ergebnisse auf Plausibilität prüfen und Ausfallzeiten überbrücken. Als Stützsysteme eignen sich fahrzeuggebundene Koppelortungssysteme, da ihre Funktion nicht durch landschaftliche Hindernisse beeinflusst wird. Die für diese Systeme notwendigen Anfangsorientierungen und Positionsabgleiche lassen sich in Verbindung mit dem DGPS automatisch durchführen.

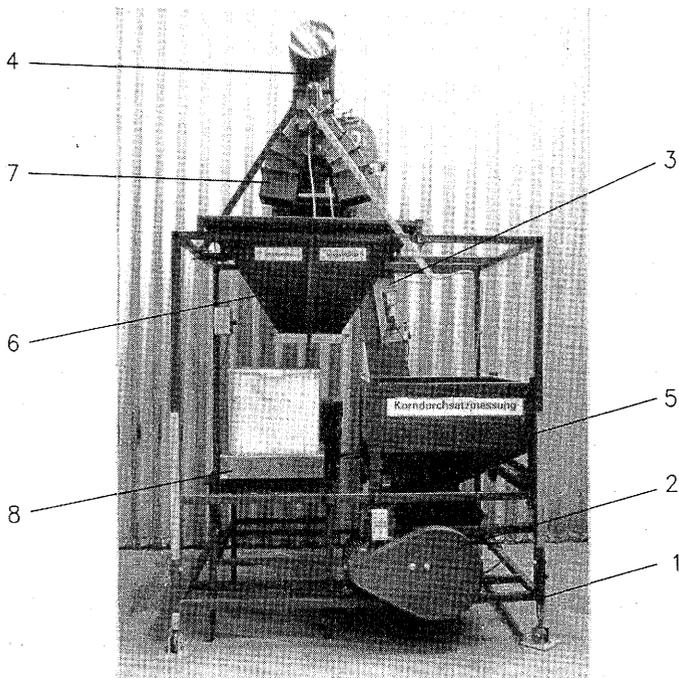
Im Rahmen der Untersuchungen zur Positionsbestimmung wurden auch Vorversuche mit zwei einfach aufgebauten Koppelortungssystemen durchgeführt, die den Fahrkurs vektoriell aus Fahrtrichtung und Fahrgeschwindigkeit berechnen. Zur Bestimmung der Fahrtrichtung des Mähdreschers wurde der Lenkwinkel an der Hinterachse bzw. die Differenzgeschwindigkeit zwischen den zwei unter der Vorderachse montierten Radargeschwindigkeitssensoren gemessen. Die Fahrgeschwindigkeit wurde aus dem Mittelwert der Geschwindigkeitsmeßwerte berechnet. Beide Systeme führten jedoch lediglich auf ebenem Gelände mit einem homogenen Untergrund zu einer stabilen Stützung. Im praktischen Feldeinsatz erwiesen sie sich auch für die Überbrückung von kurzen Ausfallzeiten des DGPS als ungeeignet. Dies begründet sich dadurch, daß die Fahrtrichtungsbestimmung besonders durch Störgrößen wie Lenkschlupf oder Änderungen der Untergrundbeschaffenheit innerhalb der Ausbreitungskeulen der Radarsensoren häufig verfälscht wird [104].

5.2 Bestimmung des Korndurchsatzes

5.2.1 Laborversuche

5.2.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Für grundlegende Untersuchungen zur Korndurchsatzmessung wurde ein Laborversuchsstand aufgebaut, **Bild 42**. Dieser ermöglicht es, die Meßeinrichtungen außerhalb des Erntezeitraums unter reproduzierbaren Versuchsbedingungen durch gezielte Parametervariationen zu untersuchen.



- | | | | |
|---|------------------------|---|-----------------|
| 1 | Rahmen | 5 | Befülltrichter |
| 2 | Querförderschnecke | 6 | Auffangbehälter |
| 3 | Elevator | 7 | Gutweiche |
| 4 | Korntankbefüllschnecke | 8 | Waage |

Bild 42: Laborversuchsstand zur Korndurchsatzmessung

Der Laborversuchsstand besteht aus einem in der Neigung stufenlos verstellbaren Rahmen (1), in den die Mähdrescherbaugruppen Querförderschnecke (2), Elevator (3) und Korntankbefüllschnecke (4) eingebaut wurden. Die verwendeten Fördererlemente und deren Anordnung sind baugleich zum Versuchsmähdrescher. Dadurch konnten die untersuchten Meßeinrichtungen zur Dichte-, Volumenstrom- und Feuchtemessung ohne konstruktive Änderungen auch in den Feldversuchen eingesetzt werden.

Das Gut wird aus einem trichterförmigen Behälter (5) auf die Querförderschnecke aufgegeben. Über einen Schieber läßt sich die Fläche der Entleerungsöffnung einstellen und somit der Durchsatz variieren. Von der Querförderschnecke wird das Gut über den Elevator und die Korntankbefüllschnecke in einen Auffangbehälter (6) gefördert. Die Gutströme der Befüll- und der Auslaufphase werden getrennt von der stationären Meßphase aufgefangen. Dazu ist am Ende der Korntankbefüllschnecke eine Gutweiche (7) angebracht und der Auffangbehälter mit einem Trennblech in zwei Bereiche unterteilt worden. Nach Erreichen der stationären Meßphase wird der Gutstrom durch Umlegen des Leitblechs der Gutweiche in den stationären Bereich des Auffangbehälters geleitet. Zur Berechnung des stationären Durchsatzes wird dabei gleichzeitig eine Zeitmessung aktiviert, die beim Zurückschwenken des Leitblechs wieder gestoppt wird. Nach Versuchsende werden die stationär und instationär aufgefangenen Gutmassen getrennt mit einer Waage (8) bestimmt. Um den Bruchkornanteil des Versuchsguts konstant zu halten, wird es nach jedem Versuch mit einer Saatgutreinigungsanlage gereinigt.

Bild 43 zeigt das Meßwerterfassungssystem des Laborversuchsstandes mit der Steuerung und dem Meßverstärker der Korndichtemeßeinrichtung sowie der Kontroll- und Anzeigeeinheit der Kornfeuchtemeßeinrichtung. Die Signale der drei Lichtschranken zur Kornvolumenstrommessung werden direkt im Meßwerterfassungssystem verarbeitet.

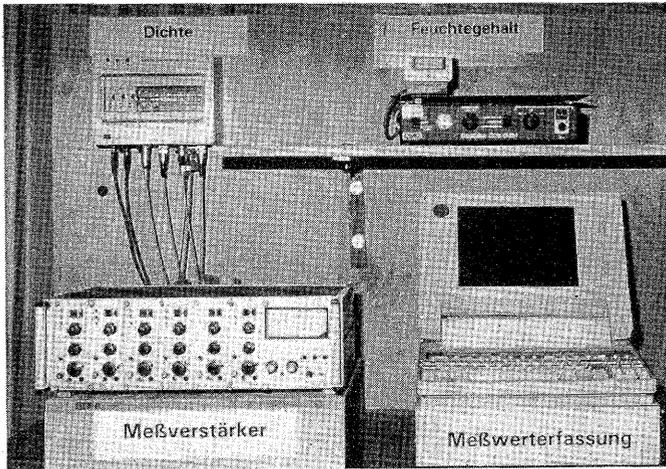


Bild 43: Meßwert erfassung für die Korndurchsatzmessung

Folgende Meßwerte wurden bei jedem Versuch aufgezeichnet:

- Schalterstellung der Gutweiche
- Dunkelzeiten der Elevatorlichtschranken
- Ausgangsspannung des Feuchtemeßgerätes
- Schalterstellungen des Dichtemeßgerätes (Brutto- und Tarameßphase)
- Ausgangsspannungen des Dichtemeßgerätes (Proben- und Referenzmasse)

Außer den stationären und instationären Gutmassenanteilen wurden zu jedem Versuch auch die Gutfeuchte, das Hektolitergewicht und die aus dem Dichtemeßgerät aufgefangene Gutmasse in Kontrollmessungen bestimmt und protokolliert.

Mit dem beschriebenen Laborversuchsstand wurden Versuche zur Kalibrierung der Korndurchsatzmeßeinrichtungen durchgeführt und die Einflüsse von Hangneigung, Gutart, Feuchtegehalt und Fördergeschwindigkeit untersucht.

Die Hangneigungswinkel in Schichtlinie α_S und in Fallinie α_F werden entsprechend der in **Bild 44** dargestellten Definitionen von der Einbaulage des Elevators aus gemessen.

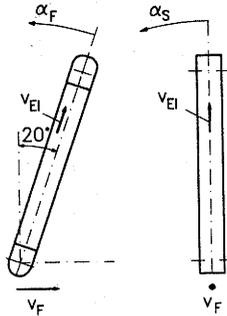


Bild 44: Definition der Neigungswinkel des Kornelevators in Schichtlinie α_S und Falllinie α_F

In **Tabelle 1** sind die untersuchten Parameter und deren Variationsbereiche zusammengestellt. Bei jeder Variation wurden Versuche über den gesamten Durchsatzbereich mit den angegebenen festen Parametern durchgeführt.

Tabelle 1: Untersuchte Parameter und deren Variationsbereiche bei den Laborversuchen zur Korndurchsatzmessung

Varierte Parameter	Variationsbereich	Feste Parameter
Hangneigung in Schichtlinie α_S	-20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20°	$\alpha_F = 0^\circ$ Weizen $U_K = 12\%$ $v_{EI} = 1,88\text{ m/s}$
Hangneigung in Falllinie α_F	-20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20°	$\alpha_S = 0^\circ$ Weizen $U_K = 12\%$ $v_{EI} = 1,88\text{ m/s}$
Gutart	Weizen, Raps, Mais	$\alpha_S = 0^\circ / \alpha_F = 0^\circ$ $\alpha_S = -10^\circ / \alpha_F = -10^\circ$ $U_K = 12\%$ $v_{EI} = 1,88\text{ m/s}$
Kornfeuchtegehalt U_K	33, 32, 30, 28, 26, 19, 17, 16, 13, 12 %	Weizen $\alpha_S = 0^\circ / \alpha_F = 0^\circ$ $\alpha_S = -10^\circ / \alpha_F = -10^\circ$ $v_{EI} = 1,88\text{ m/s}$
Kettengeschwindigkeit v_{EI}	2,35; 2,09; 1,88 ; 1,57; 1,31 m/s	Weizen $U_K = 12\%$ $\alpha_S = 0^\circ / \alpha_F = 0^\circ$ $\alpha_S = -10^\circ / \alpha_F = -10^\circ$
Korndurchsatz \dot{m}_K	0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 6,5 kg/s	

5.2.1.2 Untersuchung der Korndichtemeßeinrichtung

Um die dynamischen Verhältnisse beim Einsatz auf dem Mähdrescher zu simulieren, wurden Versuche durchgeführt, in denen die Korndichtemeßeinrichtung manuell zu ungleichförmigen Schwingungen angeregt wurde. **Bild 45** zeigt einen charakteristischen Echtzeitverlauf der verstärkten Meßbrückenausgangsspannung des Probenbehälters. Da der Biegebalken der Wägeeinrichtung um seine statische Ruhelage schwingt, wird der Mittelwert der dynamischen Meßwerte zur Bestimmung der Probenmasse m_p berechnet.

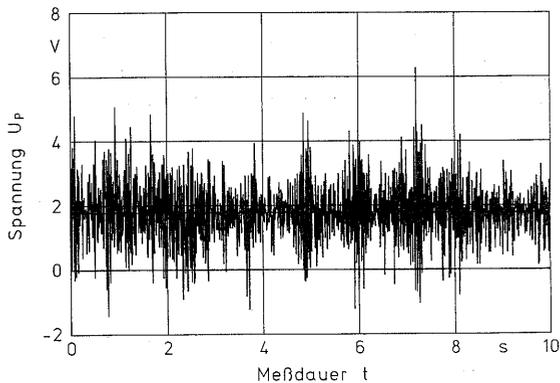


Bild 45: Meßsignal der Wägeeinrichtung des Korndichtemeßgerätes bei dynamischer Anregung

In **Bild 46** ist der Einfluß von Meßdauer und Abtastfrequenz auf die relative Abweichung des Mittelwerts der dynamischen Messung vom Meßwert der statischen Messung dargestellt. Erwartungsgemäß sinkt die relative Abweichung mit Erhöhung von Meßdauer und Abtastfrequenz. Relative Abweichungen unter 1 % werden bei einer Abtastfrequenz von 50 Hz und einer Meßdauer von 10 s erreicht.

Bild 47 zeigt die Ergebnisse einer dynamischen Kalibrierung der Wägeeinrichtung mit diesen Parametern. Aufgetragen sind die Differenzen der gemittelten Ausgangsspannungen des Probenbehälters aus der Brutto- und der Tarameßphase über der Probenmasse. Als Vergleich zu den dynamischen Messungen sind die Ergebnisse der statischen Messungen als Gerade dargestellt.

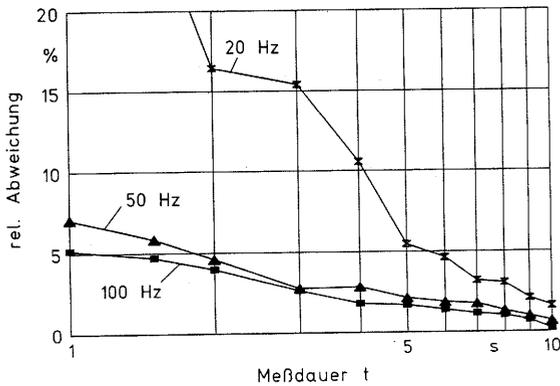


Bild 46: Einfluß von Meßdauer und Abtastfrequenz auf die Meßabweichung der Wägeeinrichtung der Korndichtemeßeinrichtung

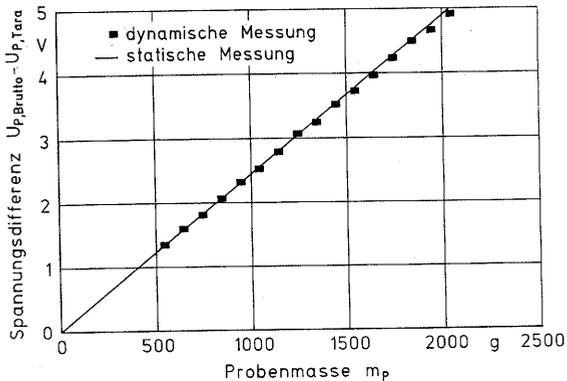


Bild 47: Kalibrierung der Wägeeinrichtung der Korndichtemeßeinrichtung

Die Ergebnisse der Korndichtemessung werden nicht nur durch die Meßabweichungen der Wägeeinrichtung sondern auch durch die Einhaltung eines konstanten Probenvolumens mit einer konstanten Verdichtung beeinflusst. Die Konstruktion ist deshalb so ausgelegt, daß der Probenbehälter bis zu einer Neigung von 20° vollständig mit einem Volumen von $V_B = 0,95$ l befüllt wird und auch bei dynamischer Anregung kein Gut ausläuft. Aus Vorversuchen ist bekannt, daß sich eine gleichmäßige Verdichtung erreichen läßt, indem die Zeit, in der

sich das Gut im befüllten Behälter vor dem Abstreifen setzen kann, über 8 s gehalten wird. Die Dauer für den gesamten Meßzyklus (ca. 34 s) setzt sich aus der durchschnittlichen Befülldauer (ca. 3 s), der eingestellten Nachverdichtungszeit (10 s), der Dauer der Bruttomeßphase (10 s), der Entleerdauer (ca. 1 s) und der Dauer der Taramesphase (10 s) zusammen.

Bild 48 zeigt Ergebnisse der Korndichtemeßeinrichtung bei automatisierter Probenentnahme bei einer Abtastfrequenz von 50 Hz. Dargestellt sind die ermittelten Korndichten bei Variation der Hangneigung in Schichtlinie. Als Vergleichsdichte zur automatisierten Messung ist das mit einem eichfähigen Getreideprober (1/4 l, Bauart 1938) bestimmte Hektolitergewicht aufgetragen.

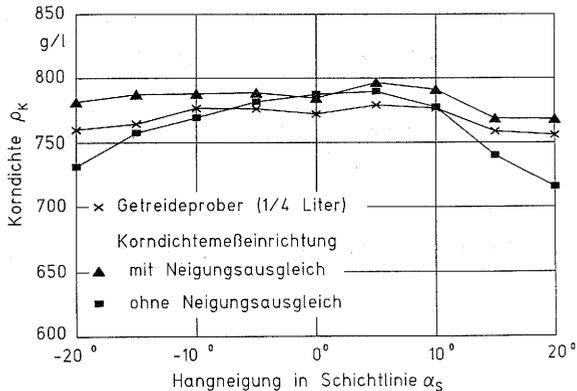


Bild 48: Einfluß der Hangneigung auf die Korndichtemeßeinrichtung (WW 'Ares', $U_K = 12\%$)

Obwohl in allen Versuchen das gleiche Gut (WW 'Ares') verwendet wurde, wurde das Hektolitergewicht für jeden Versuch kontrolliert, da die Versuche über einen Zeitraum von mehreren Tagen durchgeführt wurden. Am Verlauf der Meßwerte des Getreideprobers ist zu erkennen, daß das Hektolitergewicht aufgrund von Veränderungen des Feuchtegehalts und der Gutzusammensetzung (Bruchkorn) geringfügig variierte. Die von der Korndichtemeßeinrichtung mit Neigungsausgleich nach Gl.(16) berechneten Werte zeigen einen entsprechenden Verlauf, liegen aber etwas höher. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Probe durch die Schwingungen der Förderorgane nachverdichtet wird, so daß mit der

automatisierten Meßeinrichtung die Rütteldichte bestimmt wird. Weiterhin ist am Verlauf der Meßergebnisse ohne Neigungsausgleich zu erkennen, daß die Abweichungen bei der Dichteberechnung ohne den Einsatz der Referenzmasse mit zunehmender Hangneigung ansteigen.

5.2.1.3 Untersuchung der Kornvolumenstrommeßeinrichtung

Um Erkenntnisse über die Verlagerung des Guts im Kornelevator beim Einsatz des Mähdreschers auf hängigem Gelände zu erhalten, wurden Versuche durchgeführt, in denen die Neigung des Laborversuchsstands sowohl in Schichtlinie als auch in Fallinie verstellt wurde (vgl. Tab. 1). Bei einigen Versuchen wurde der Fördervorgang im Bereich der durchsichtigen Plexiglas-Paddelführung zusätzlich mit einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen.

Im **Bild 49** sind die bei einem Versuch aufgezeichneten Dunkelzeiten exemplarisch dargestellt. Die Dunkelzeiten T_{D1} , T_{D2} , T_{D3} beziehen sich auf die Anordnung der Lichtschranken nach Bild 30, wobei die Dunkelzeit T_{D1} quer zur Fahrtrichtung und die Dunkelzeiten T_{D2} und T_{D3} in Fahrtrichtung gemessen werden.

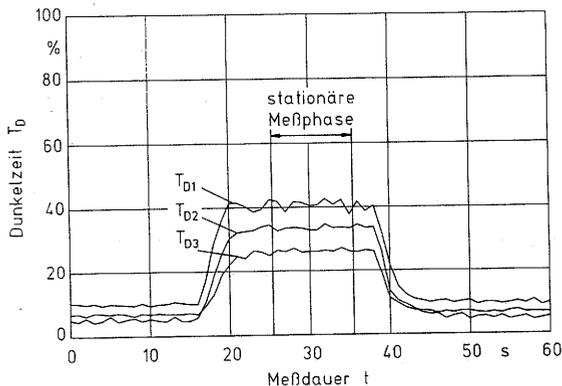


Bild 49: Echtzeitverläufe der Dunkelzeiten T_D bei einem Laborversuch ($\alpha_S = \alpha_F = 0^\circ$, WW 'Ares', $U_K = 12\%$, $v_{El} = 1,88$ m/s, $\dot{m}_K = 2,8$ kg/s)

Auffallend ist, daß die Dunkelzeit T_{D2} bei der Neigung $\alpha_S = 0^\circ$ über der Dunkelzeit T_{D3} liegt. Dies begründet sich dadurch, daß sich das Gut im Elevator bei der Beschickung mit der Querförderschnecke an der Elevatorwand anstaut.

Bild 50 zeigt Beispiele für die Verläufe der über dem Kornvolumenstrom aufgetragenen Dunkelzeiten der drei Lichtschranken bei verschiedenen in Bild 44 definierten Neigungen des Versuchsstandes. Dargestellt sind die während der stationären Meßphase berechneten Mittelwerte der Dunkelzeiten abzüglich der durch die Dicke der Paddel hervorgerufenen Dunkelzeiten, die beim Leerlauf des Elevators ermittelt worden sind. Der Kornvolumenstrom \dot{V}_K wird aus dem Quotienten des stationären Kornmassenstroms \dot{m}_K und dem Meßwert der automatisierten Korndichtemeßeinrichtung ρ_K berechnet.

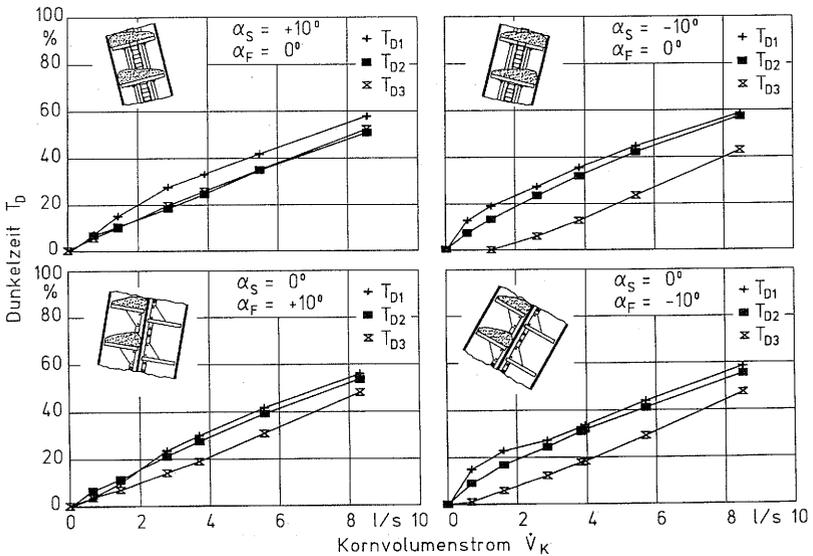


Bild 50: Einfluß der Hangneigungen α_S und α_F auf die Dunkelzeiten T_{D1} , T_{D2} , T_{D3} (WW 'Ares', $U_K = 12\%$, $v_{EL} = 1,88$ m/s)

In Übereinstimmung mit den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen die Dunkelzeitverläufe, daß sich das Gut sowohl in Schichtlinie als auch in Falllinie zur geneigten Seite hin verlagert.

In Abhängigkeit von der Neigung ändern sich dadurch die absoluten Werte und die Verläufe der Dunkelzeitmessungen. Der nichtlineare Anstieg der Meßwertverläufe ist darauf zurückzuführen, daß sich das Gut bei kleinen Volumenströmen zunächst an der geeigneten Seite des Paddels ansammelt und nicht dessen gesamte Fläche bedeckt.

Zur Kompensation des Einflusses der Hangneigung auf die Dunkelzeitmessungen wurden verschiedene Verfahren untersucht. Aus den Dunkelzeiten der drei Lichtschranken wird ein Meßsignal berechnet, das mit dem Kornvolumenstrom weitgehend unabhängig von der Verteilung des Gutes korreliert. Untersucht wurden die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes sowie Verfahren, in denen die einzelnen Dunkelzeiten entsprechend der Einbaulage der Lichtschranken im Elevator gewichtet werden.

Für die vorliegende Anordnung der Lichtschranken wurden die genauesten Ergebnisse erzielt, indem aus den Dunkelzeiten T_{D1} , T_{D2} und T_{D3} der minimale Wert $T_{D,min}$, der maximale Wert $T_{D,max}$ und der dazwischenliegende mittlere Wert $T_{D,mittel}$ bestimmt werden. Hieraus wird ein als Ersatzdunkelzeit T_{DE} bezeichnetes Meßsignal mit dem empirisch ermittelten Faktoren k_1 und k_2 wie folgt berechnet:

Fall 1: $T_{D1} = T_{D,max}$

$$T_{DE} = k_1 \cdot T_{D,mittel} + k_2 \cdot T_{D,min} \quad (20)$$

Fall 2: $T_{D1} \neq T_{D,max}$

$$T_{DE} = k_2 \cdot T_{D,mittel} + k_1 \cdot T_{D,min} \quad (21)$$

Bild 51 zeigt einen Vergleich der Versuche mit geneigtem und eben ausgerichtetem Versuchsstand. Die Meßergebnisse der in der Ebene durchgeführten Versuche ($\alpha_S = 0^\circ/\alpha_F = 0^\circ$) sind durch einen Kurvenzug verbunden.

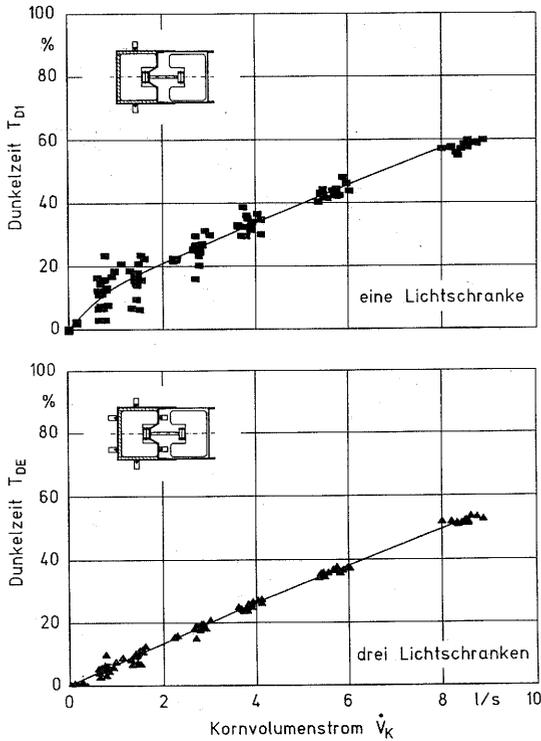


Bild 51: Kompensation des Einflusses der Hangneigungen α_S und α_F auf die Dunkelzeiten T_{D1} und T_{DE} (WW 'Ares', $U_K = 12\%$, $v_{EI} = 1,88$ m/s)

Zur Beurteilung der Neigungskompensation durch die Verwendung von drei Lichtschranken wird die berechnete Ersatzdunkelzeit T_{DE} der gemessenen Dunkelzeit T_{D1} gegenübergestellt. Anhand der Breite des Streubands ist zu erkennen, daß durch die Berechnung der Ersatzdunkelzeit besonders im Bereich kleiner und mittlerer Volumenströme eine wesentliche Verminderung der Meßabweichungen erzielt wird.

In Bild 52 ist der Einfluß der Kettengeschwindigkeit v_{El} auf die Dunkelzeiten T_{D1} und T_{DE} dargestellt.

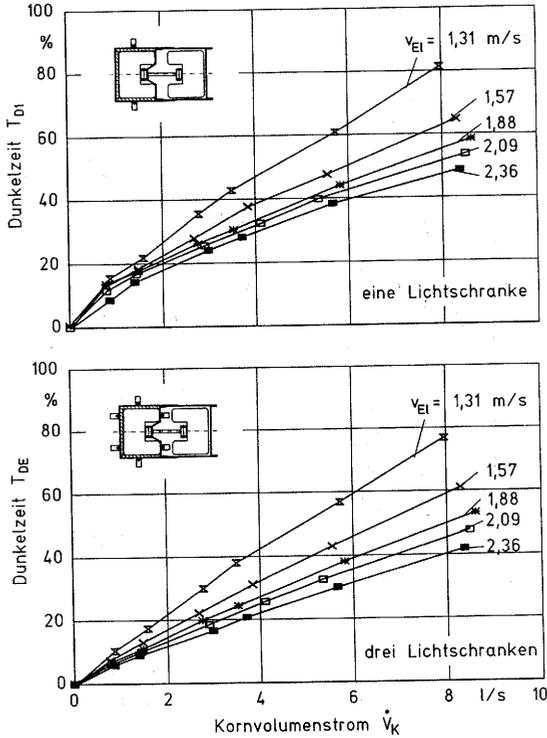


Bild 52: Einfluß der Kettengeschwindigkeit v_{El} auf die Dunkelzeiten T_{D1} und T_{DE} ($\alpha_S = \alpha_F = 0^\circ$, WW 'Ares', $U_K = 12\%$)

Im Vergleich zur Kettengeschwindigkeit bei Nenndrehzahl des Elevator $v_{El, \text{nenn}} = 1,88 \text{ m/s}$ wurden je zwei höhere und niedrigere Geschwindigkeiten untersucht. Erwartungsgemäß bewirkt eine Verminderung der Fördergeschwindigkeit bei konstantem Kornvolumenstrom eine Erhöhung des auf den Paddeln geförderten Gutvolumens und somit höhere Dunkelzeiten. Entsprechend stellen sich bei einer Erhöhung der Fördergeschwindigkeit niedrigere Dunkelzeiten ein.

Wie **Bild 53** zeigt, läßt sich der Einfluß der Kettengeschwindigkeit durch Berechnung der Ersatzdunkelzeit T'_{DE} nach Gl.(18) kompensieren. Für die gemessene Dunkelzeit T'_{D1} gelingt dies nicht vollständig, da die Fördergeschwindigkeit auch die Gutverteilung auf den Paddeln beeinflusst.

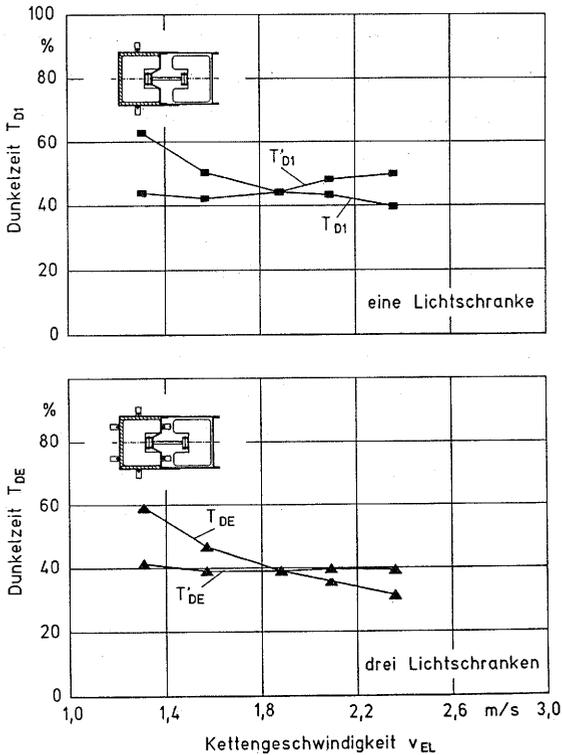


Bild 53: Kompensation des Einflusses der Kettengeschw. v_{El} auf die Dunkelzeiten T_{D1} und T_{DE} ($\alpha_S = \alpha_F = 0^\circ$, WW 'Ares', $U_K = 12\%$, $\dot{V}_K = 6 \text{ l/s}$)

Zur Kalibrierung der Kornvolumenstrommeßeinrichtung wird die Abhängigkeit zwischen der Dunkelzeit T'_{DE} und dem Kornvolumenstrom \dot{V}_K durch ein Polynom zweiten Grades beschrieben:

$$\dot{V}_K = a_0 + a_1 \cdot T'_{DE} + a_2 \cdot T'_{DE}{}^2 \quad (22)$$

In die Berechnung der Parameter a_i gehen nur die Ergebnisse bei eben ausgerichtetem Versuchsstand ein. Die Einbeziehung der Dunkelzeitmessungen bei geneigtem Versuchsstand würde zwar zu einer Verminderung der mittleren Abweichung führen, jedoch die Meßgenauigkeit beim häufigsten Mähdrescher-einsatz, dem Dreschen in der Ebene, herabsetzen.

Da die Parameter der Kalibrierfunktion durch die Einbauorte der Lichtschranken beeinflußt werden, müssen sie bei jeder Änderung neu bestimmt werden. Gleiches gilt auch bei Änderungen der Elevatorkettenspannung. Sie sollte deshalb im Feldeinsatz regelmäßig kontrolliert werden.

5.2.1.4 Untersuchung der Kornfeuchteeinrichtung

Die Untersuchung der kapazitiven Kornfeuchteeinrichtung unter Laborbedingungen erfolgte mit Winterweizen der Sorte Ares. Das Versuchsgut wurde dazu auf einen Kornfeuchtegehalt von über 30 % befeuchtet, zur Verminderung des Einflusses der Oberflächenfeuchte 24 Stunden gelagert und anschließend stufenweise auf die in **Bild 54** dargestellten Kornfeuchtegehalte heruntergetrocknet.

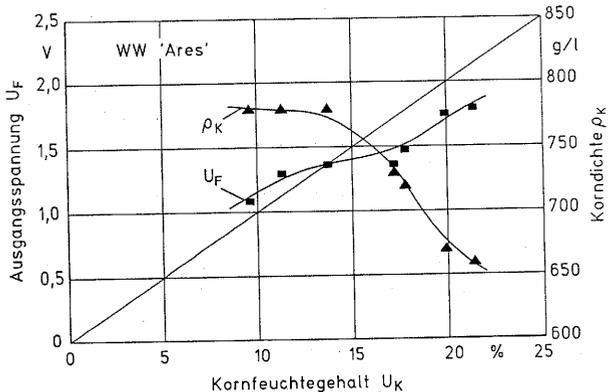


Bild 54: Einfluß des Kornfeuchtegehalts auf die Ausgangsspannung U_F der Kornfeuchteeinrichtung und die Korndichte ρ_K

Direkt nach der Messung wurden aus dem Versuchsgut Proben entnommen, auf einer Präzisionswaage eingewogen und über eine Dauer von 24 Stunden in einem Trockenschrank bei einer Temperatur von 105 °C getrocknet. Die Bestimmung der Restmassen der Proben erlaubte die Berechnung des Feuchtegehalts. Parallel zur Trockenschrankmethode wurde ein geeichtes Schnellfeuchte-meßgerät verwendet, das auch während der Feldversuche zum Einsatz kam. Die nachträgliche Befeuchtung des Gutes entspricht zwar nicht realen Feldbedingungen, unter denen das Gut auch in Abhängigkeit vom Reifezustand trocknet, die ermittelten Zusammenhänge decken sich jedoch mit Ergebnissen von Feldversuchen [105].

Zur Kalibrierung der Kornfeuchte-meßeinrichtung wurde die Offsetspannung so eingestellt, daß die Ausgangsspannung bei einem Feuchtegehalt von 14 % den Wert $U_F = 1,4 \text{ V}$ annimmt. Das Bild 54 zeigt, daß die Ausgangsspannung der Kornfeuchte-meßeinrichtung mit dem Kornfeuchtegehalt U_K ansteigt, aber unterhalb und oberhalb des Kalibrierfeuchtegehalts von der Solllinie abweicht. Die unter Laborbedingungen ermittelten Abweichungen der Feuchtemessung bei Weizen wurden auch in Feldversuchen des Prairie Agricultural Machinery Institutes (PAMI) [105] festgestellt. Zurückzuführen sind diese Abweichungen vorwiegend darauf, daß der Feuchtegehalt auch die Dichte des Erntegutes und somit dessen Dielektrizitätskonstante beeinflusst. Der für Weizen ermittelte Einfluß des Kornfeuchtegehalts auf die Korndichte entspricht den Ergebnissen von Scherer u. Kutzbach [106]. Bei großen Änderungen des Feuchtegehalts innerhalb des Erntezeitraums sollten deshalb Kalibrierungen in verschiedenen Feuchtegehaltsstufen durchgeführt werden.

Durch die Anpassung der Empfindlichkeit der Kornfeuchte-meßeinrichtung oder durch die Verwendung einer für die jeweilige Gutart ermittelten Kalibrierfunktion lassen sich die Abweichungen reduzieren.

5.2.1.5 Einflüsse auf die Kornmassenstromberechnung

In diesem Kapitel werden die Einflüsse von Hangneigung, Gutfeuchtegehalt und Gutart auf die Berechnung des Kornmassenstroms aus dem Produkt der Meßergebnisse der Korndichte- und der Kornvolumenstrommeßeinrichtung unter Laborbedingungen dargestellt. Inhomogenitäten und Verunreinigungen des Guts waren gering, wodurch besonders die durch die nur periodisch durchgeführte Korndichtemessung bedingten Abweichungen im Gegensatz zum Feldeinsatz geringer ausfallen. Um die berechneten und die gemessenen Kornmassenströme direkt miteinander vergleichen zu können, werden die Ergebnisse der Kornfeuchtemessung hier nicht berücksichtigt.

Bild 55 zeigt den Einfluß der Hangneigungen auf die Berechnung des Kornmassenstroms. Zum Vergleich werden die Ergebnisse der Meßeinrichtung mit einer Lichtschranke denen mit drei Lichtschranken gegenübergestellt. Wie die Untersuchung der Kornvolumenstrommeßeinrichtung (Bild 51) bereits zeigte, führt der Einsatz von drei Lichtschranken zu einer Verminderung des Neigungseinflusses.

Im **Bild 56** ist der Einfluß der Gutfeuchte auf die Korndurchsatzmessung dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, daß die Gutfeuchte im normalen Einsatzbereich des Mähdreschers ($U_K = 12$ bis 20 %) weder auf die Berechnung des Kornmassenstroms mit einer als auch auf die Berechnung mit drei Lichtschranken einen erkennbaren Einfluß ausübt. Dies ist auf die genaue Ermittlung der Korndichte, die durch den Kornfeuchtegehalt beeinflusst wird, zurückzuführen. Bei Feuchtegehalten über 22 % konnten die hohen Durchsätze mit dem Laborversuchsstand nicht untersucht werden, weil das Gut nur ungleichmäßig aus dem Befülltrichter auslief. Doch schon bei den erreichten Durchsätzen stellte sich bei den Messungen mit nur einer Lichtschranke eine signifikante Abweichung zur exakten Messung ein. Die Ursache hierfür liegt darin, daß sich die Verteilung des Guts auf den Paddeln in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt ändert. Wie bei den Untersuchungen zum Hangneigungseinfluß liefert die Anordnung von drei Lichtschranken auch hier genauere Ergebnisse.

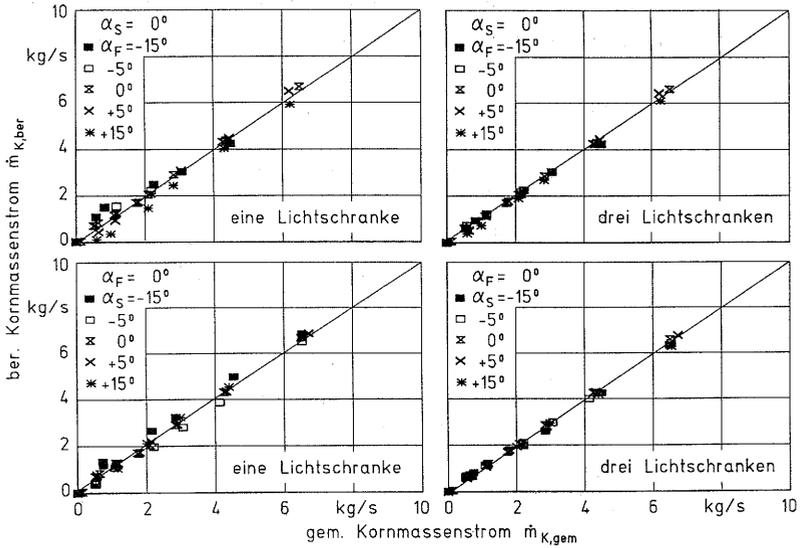


Bild 55: Einfluß der Hangneigungen α_F und α_S auf die Berechnung des Kornmassenstroms \dot{m}_K (WW 'Ares', $U_K = 12\%$, $v_{EI} = 1,88$ m/s)

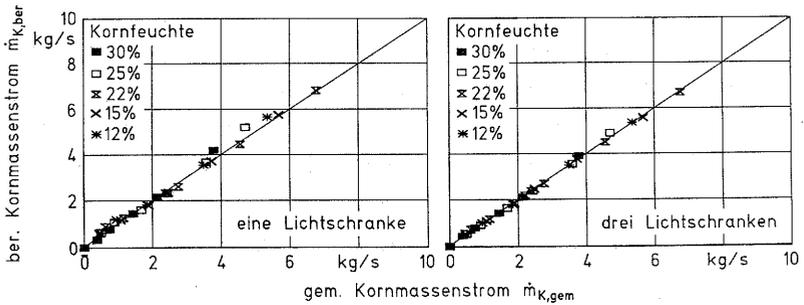


Bild 56: Einfluß des Kornfeuchtegehalts U_K auf die Berechnung des Kornmassenstroms \dot{m}_K ($\alpha_F = 0^\circ$, $\alpha_S = 0^\circ$, WW 'Ares', $v_{EL} = 1,88$ m/s)

Deutlicher als der Einfluß des Feuchtegehalts ist der in **Bild 57** dargestellte Einfluß der Gutart auf die Korndurchsatzmessung zu erkennen. Als Vergleich zu den mit Weizen durchgeführten Versuchen wurde das Verhalten von Raps und Mais untersucht.

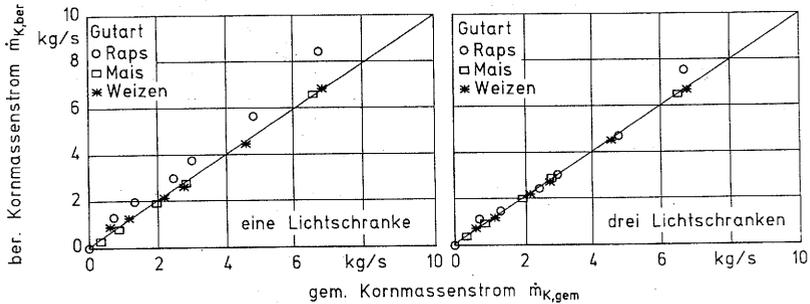


Bild 57: Einfluß der Gutart auf die Berechnung des Kornmassenstroms \dot{m}_K
($\alpha_F = 0^\circ$, $\alpha_S = 0^\circ$, $v_{El} = 1,88$ m/s)

Im Gegensatz zum grobkörnigen Mais weichen die Meßergebnisse einer Lichtschranke beim feinkörnigen Raps sehr stark vom tatsächlichen Massenstrom ab. Beim Dreschen von Raps muß bei dieser Meßeinrichtung demnach eine spezielle Kalibrierfunktion verwendet werden.

Dies ist bei der Anordnung von drei Lichtschranken im normalen Durchsatzbereich nicht notwendig. Bei sehr hohen Raps-Durchsätzen ergeben sich aber auch hier hohe Abweichungen, die darauf zurückzuführen sind, daß durch den Spalt zwischen Elevatorpaddel und Elevatorwand trotz der eingebauten Plexiglasführung Rapskörner hinunterfallen. Diese Körner unterbrechen die Strahlen der Lichtschranken zusätzlich und verfälschen dadurch die Meßergebnisse.

5.2.2 Feldversuche

5.2.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur experimentellen Untersuchung der Korndurchsatzmeßeinrichtungen unter Praxisbedingungen wurden in den Jahren 1992 bis 1995 Feldversuche in Weizen-, Gerste- und Haferbeständen durchgeführt.

Vor Beginn der eigentlichen Feldversuche wurde die Kalibrierung der Maßeinrichtungen stationär überprüft, indem eingelagertes Getreide dem Mähdrescher über die Reinigungsanlage zugeführt wurde. Zur Bestimmung des Kornmassenstroms wurde der in den Korntank geförderte Körnerstrom durch Umschalten einer hydraulisch betätigten Gutweiche für eine definierte Zeit in einen separaten Wägebühler geleitet (vgl. Beck [78]).

Während der Ernte wurden regelmäßige Kontrollmessungen zur Bestimmung des Kornfeuchtegehalts (eichfähiges Schnellfeuchtemeßgerät) und des Hektolitergewichts (Getreideprober 1/4 l) durchgeführt. Sowohl Zeitpunkt als auch Position der Probenentnahme wurden protokolliert. Zu jedem Versuch wurde die auf Anhänger abgetankte Kornmasse mit einer Brückenwaage ermittelt.

Bei Angaben zu Abweichungen von Korndurchsatzmeßeinrichtungen, die mittels Gegenwiegung von Korntankinhalten, Anhängerbeladungen oder der gesamten geernteten Kornmasse eines Feldes ermittelt werden, ist zu beachten, daß die Störgrößen auf die Maßeinrichtungen zeitlich und örtlich variieren. Hieraus resultierende Abweichungen gleichen sich über eine längere Versuchsdauer bzw. über eine größere Versuchsfläche häufig aus. Derart bestimmte mittlere Abweichungen lassen sich deshalb nicht auf die teilflächenspezifische Korndurchsatzmessung übertragen. Zur Bestimmung der örtlichen Abweichungen in der Kornmassenstromberechnung wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit zusätzliche Kontrollmessungen durchgeführt, in denen die auf Strecken von 20 m geerntete Kornmasse direkt mit der im Korntank des Versuchsmähdreschers montierten Wägeeinrichtung bestimmt wurde.

5.2.2.2 Ergebnisse

Bild 58 zeigt exemplarisch den Verlauf des Kornmassenstroms \dot{m}_K und der akkumulierten Kornmasse m_K während eines Feldversuchs. Deutlich zu erkennen sind durch Standzeiten und Leerfahrten an den Wendeflächen bedingte Zeiten, in denen kein Gut an den Lichtschranken vorbeigefördert wurde.

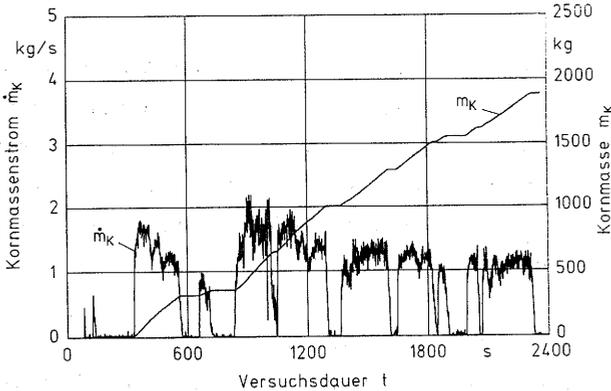


Bild 58: Verlauf des Kornmassenstroms \dot{m}_K und der Kornmasse m_K während eines Feldversuchs (Meiereihof, 02.08.95, SG 'Alexis')

Analytisch gilt für die während der Versuchsdauer t aufgenommene Kornmasse:

$$m_K = \int_0^t \dot{m}_K dt \quad (23)$$

Für den in **Bild 59** dargestellten Vergleich mit den Ergebnissen der Anhängerkontrollwägungen wird die Kornmasse m_K jedoch numerisch durch die Summation der Produkte aus Kornmassenstrom \dot{m}_K und Abtastdauer T_A ($= 1s$) berechnet:

$$m_K = \sum_{i=0}^n \dot{m}_K \cdot T_A \quad (24)$$

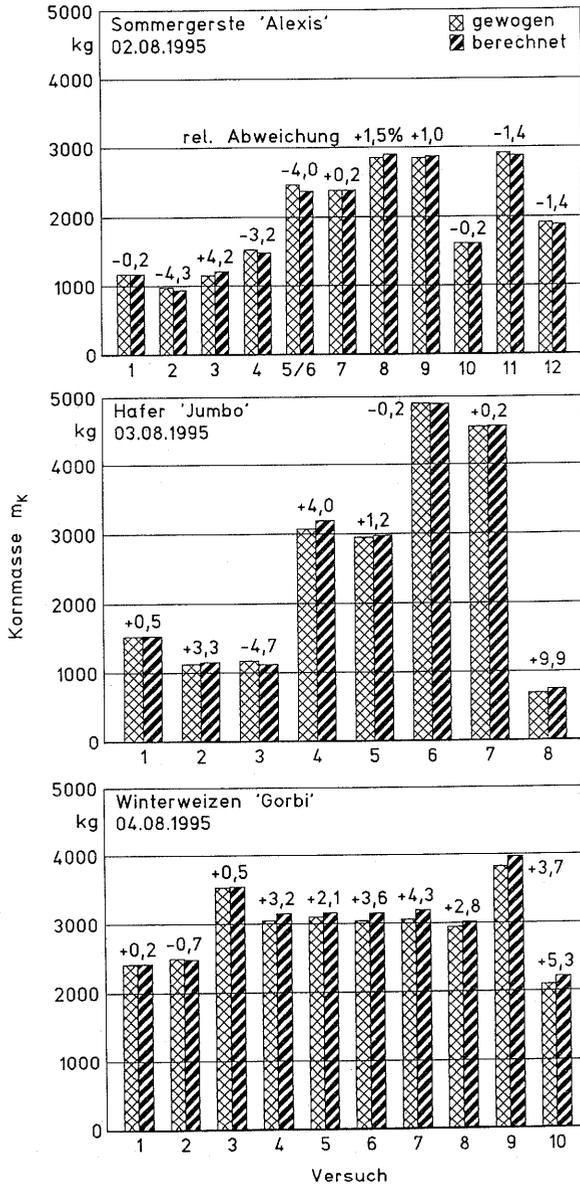


Bild 59: Vergleich der berechneten und gewogenen Kornmassen

Bei der Betrachtung der in Bild 59 ebenfalls dargestellten relativen Abweichungen der Kornmassenberechnung zu den Anhängerkontrollwägungen ist zu beachten, daß die Kalibrierfaktoren für die Korndichte- und die Kornvolumenstrommeßeinrichtungen in allen Gutarten unverändert beibehalten wurden.

Die höchsten Abweichungen stellten sich besonders bei geringen Korndurchsätzen ($\dot{m}_K < 1 \text{ kg/s}$) in Hanglage ein. Dies zeigte sich ebenfalls bei der Analyse der mit der Wägeeinrichtung im Korntank durchgeführten örtlichen Kontrollmessungen. Lagen zudem noch hohe Variationen in der Korndichte vor, ergaben sich maximale örtliche Abweichungen von bis zu 25 %.

Bild 60 zeigt den Verlauf der Korndichte- und der Kornfeuchtegehaltmessungen über dem Tagesverlauf. Dargestellt sind die für jeden Versuch berechneten Mittelwerte der Meßergebnisse. Die Offsetspannung für die Kornfeuchtemeßeinrichtung wurde bei den dargestellten Versuchen jeweils zum Erntebeginn an das Ergebnis einer stationären Schnellfeuchtemessung angepaßt und über den Erntetag beibehalten.

In **Bild 61** sind die entsprechenden Ergebnisse der Kontrollmessungen dargestellt. Erwartungsgemäß fallen die Ergebnisse der Korndichtemeßeinrichtung auf dem Mährescher durch die Nachverdichtung des Guts höher aus als die stationär mit dem Getreideprober bestimmten Hektolitergewichte.

Im Verlauf der Meßergebnisse überlagern sich der tageszeit- und witterungsabhängige Trocknungsablauf mit standortabhängigen Variationen in den Stoffeigenschaften des Ernteguts. Letztere treten insbesondere bei verunkrauteten oder beschatteten Feldbereichen auf und bewirken zudem eine Streuung der Meßergebnisse. Bei der Ernte der Sommergerste wurde ein durch hohe Bäume beschatteter Feldbereich separat abgeerntet, was zu einem Anstieg des Kornfeuchtegehalts in der Zeit zwischen 16:30 bis 19:30 Uhr führte. Durch eine Kartierung des Kornfeuchtegehalts lassen sich derartige standortabhängige Variationen deutlich erkennen (siehe Kap.6).

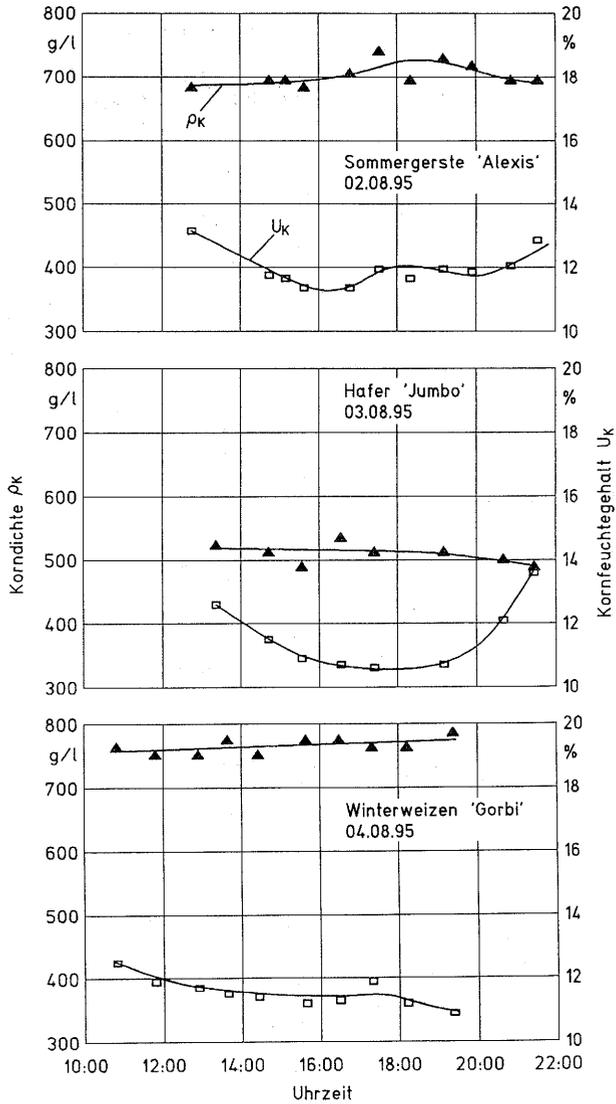


Bild 60: Verlauf der Korndichte ρ_K und des Kornfeuchtegehalts U_K über dem Tagesverlauf (Ergebnisse der Meßeinrichtungen)

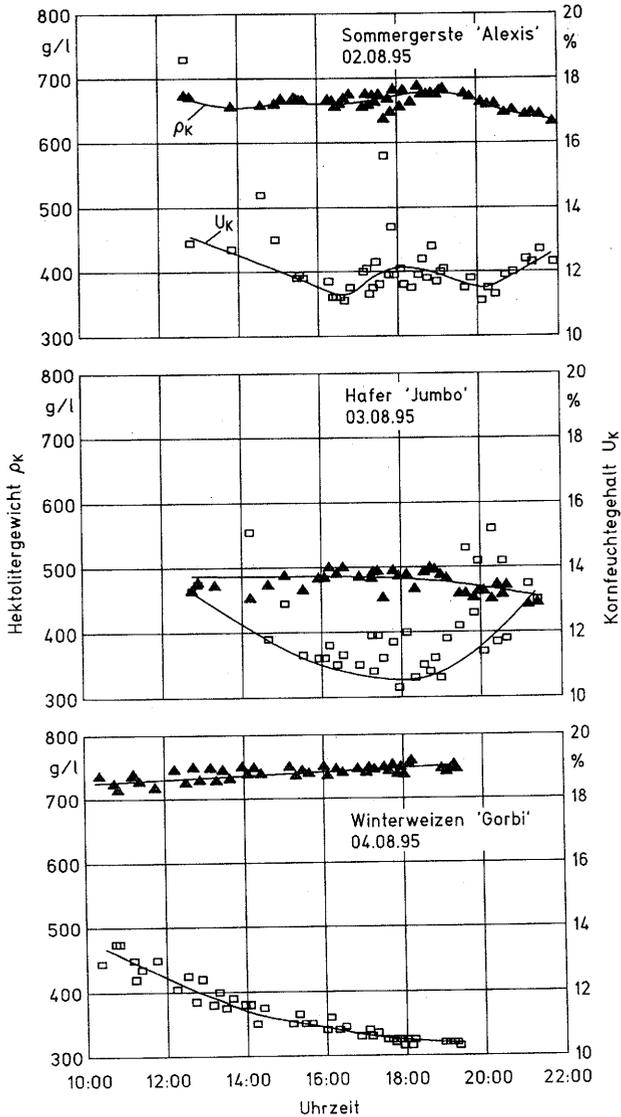


Bild 61: Verlauf des Hektolitergewichts ρ_K und des Kornfeuchtegehalts U_K über dem Tagesverlauf (Ergebnisse der Kontrollmeßeinrichtungen)

5.3 Weg-/Geschwindigkeitsmessung

5.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

In den in dieser Arbeit beschriebenen experimentellen Untersuchungen zur Weg- bzw. Geschwindigkeitsmessung wird das vom DGPS-Empfänger berechnete Geschwindigkeitssignal mit den Meßergebnissen der Radargeschwindigkeitssensoren verglichen. Dazu wurden mit dem Versuchsmähdrescher während der Getreideernte Versuchsfahrten durchgeführt, wobei die GPS-Empfangsantenne senkrecht über der Mitte der Vorderachse auf dem Dach der Fahrerkabine montiert war, so daß sich beide Meßeinrichtungen auf den selben Punkt beziehen.

5.3.2 Ergebnisse

Um Einflüsse durch die Bodenbeschaffenheit auszuschließen, wurde die Kalibrierung der Radargeschwindigkeitssensoren auf einer Versuchsfläche durchgeführt, indem deren Impulsraten beim Abfahren einer 20 m langen Strecke mit gleichmäßigem Stoppelbestand bestimmt wurden. Bei Variation der Fahrgeschwindigkeit im Bereich zwischen 0,5 und 2,0 m/s lagen die Abweichungen der Impulsraten unter 0,5 % vom Mittelwert.

Bild 62 zeigt die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen mit den Radarsensoren $v_{F, \text{Radar}}$ und dem DGPS $v_{F, \text{DGPS}}$ sowie die hieraus berechneten Fahrstrecken. Deutlich zu erkennen sind offensichtliche Fehlmessungen des DGPS in Standzeiten, die darauf zurückzuführen sind, daß bereits geringe Abweichungen in der Positionsberechnung als Relativbewegung gedeutet werden. Durch die Invertierung des Geschwindigkeitssignals mit dem Fahrtrichtungsschalter werden diese Fehlmessungen als Rückwärtsfahrt interpretiert. Befindet sich der Mähdrescher dagegen in Bewegung, treten nur geringe Unterschiede zwischen den Meßergebnissen auf, die insbesondere durch eine im Vergleich zu den Radarsensoren geringere Dynamik der DGPS-Geschwindigkeitsberechnung hervorgerufen werden.

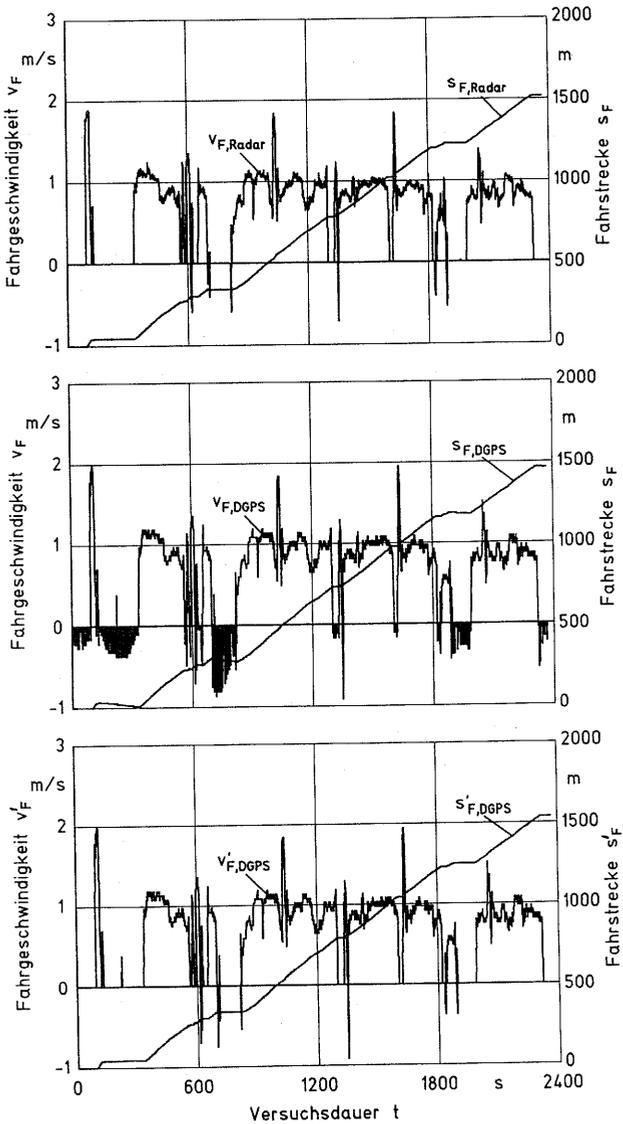


Bild 62: Geschwindigkeitsmessung mit Radarsensoren und DGPS

Bei dem im unteren Diagramm von Bild 62 dargestellten Verlauf der Fahrgeschwindigkeit $v'_{F,DGPS}$ sind die Fehlmessungen während der Standzeiten eliminiert worden, indem über das Signal der Radarsensoren entschieden wird, ob der Mähdrescher fährt oder steht.

Zum direkten Vergleich der Geschwindigkeitsmeßeinrichtungen ist die Differenz zwischen der korrigierten Fahrgeschwindigkeit $v'_{F,DGPS}$ und den Ergebnissen der Radarsensoren $v_{F,Radar}$ in **Bild 63** dargestellt.

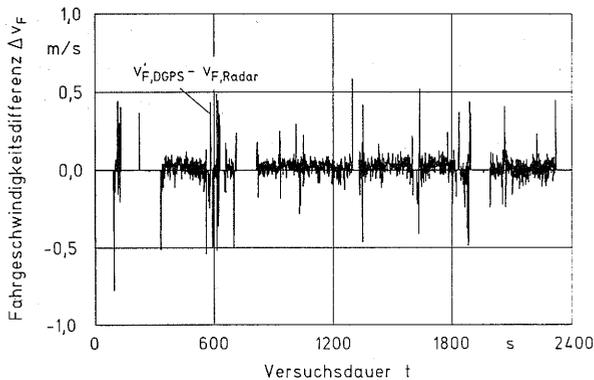


Bild 63: Vergleich der Geschwindigkeitsmessung mit Radarsensoren und DGPS über die Fahrgeschwindigkeitsdifferenz Δv_F

Um das DGPS-Geschwindigkeitssignal als Alternative zur schlupffreien Geschwindigkeitsmessung mit Radarsensoren zu nutzen, lassen sich die Standzeiten und die Fahrtrichtung auch auf einfache Weise durch einen im Abtriebsstrang montierten Impulsgeber mit Drehrichtungserkennung bestimmen. Ein Einfluß der Bodenoberfläche oder des Bewuchses auf die Meßergebnisse ist beim DGPS nicht vorhanden.

5.4 Schnittbreitenmessung

5.4.1 Laborversuche

5.4.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

In Laborversuchen zur Schnittbreitenmessung wurde untersucht, inwieweit sich die Herstellerangaben zum Meßbereich und den Meßabweichungen von Ultraschall-Abstandssensoren, die sich auf ein senkrecht ausgerichtetes Objekt aus schallreflektierendem Material beziehen, auf die Messung gegen Getreidehalme übertragen lassen. Unterschiedliche Bestandskanten wurden durch Einspannen von Getreidehalmen in eine Halterung, die auf einem Förderband im Abstand a_{SB} am Ultraschall-Abstandssensor vorbeibewegt wurde, erzeugt, **Bild 64**.

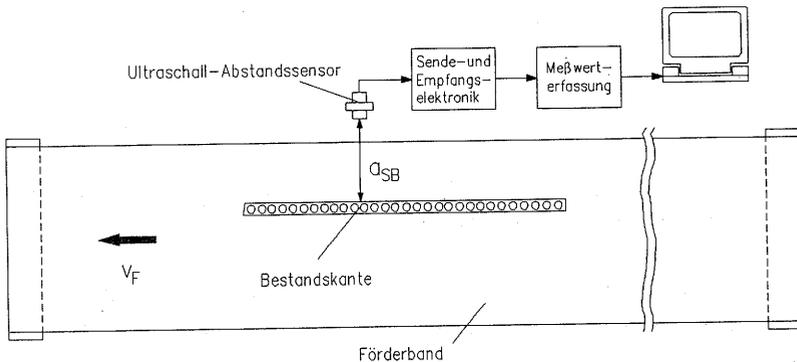


Bild 64: Laborversuchsaufbau zur Schnittbreitenmessung mit Ultraschall-Abstandssensoren

Zur Untersuchung des Einflusses der Fahrgeschwindigkeit v_F konnte die Bandgeschwindigkeit stufenlos variiert werden.

Die im folgenden dargestellten Meßwerte U_{SB} geben den nach einer Meßdauer von 1 s berechneten Mittelwert der mit einer Abtastrate von 50 Hz erfaßten Sensorausgangsspannungen wieder.

5.4.1.2 Ergebnisse

Im Bild 65 ist der Einfluß des Abstands a_{SB} zwischen dem in Kap. 4.5 beschriebenen Ultraschall-Abstandssensor und einer senkrecht ausgerichteten, nicht bewegten Bestandskante aus Getreidehalmen auf die Ausgangsspannung des Sensors U_{SB} dargestellt.

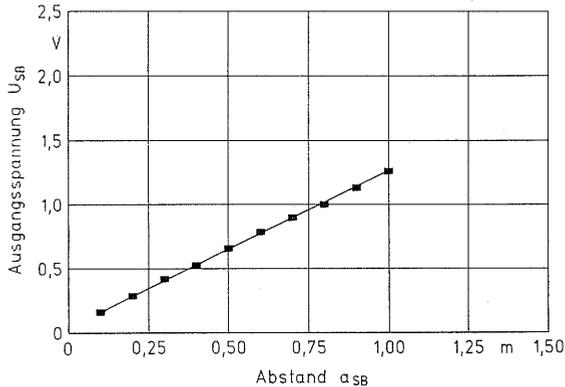


Bild 65: Einfluß des Abstands a_{SB} auf die Ausgangsspannung der Ultraschall-Abstandssensoren U_{SB} bei der Messung gegen Getreidehalme

Die Ergebnisse dieser statischen Kalibrierung zeigen eine lineare Abhängigkeit. Eine stabile Abstandsmessung findet bereits bei einem Abstand von $a_{SB} = 0,1$ m statt. Die maximale Reichweite der Sensoren wird durch die diffuse Reflexion an den Getreidehalmen dagegen stark reduziert und beträgt unter den Laborbedingungen ca. 1,0 m.

Auch ein Ultraschall-Abstandssensor mit einer angegebenen Reichweite von 6,0 m, der in Vorversuchen eingesetzt wurde, ermöglichte keine Erweiterung des Meßbereichs. Um zu vermeiden, daß außer der Bestandskante keine anderen Objekte wie Stoppeln oder Haspelzinken im Bereich der Schallkeule liegen, muß dieser Sensor derart montiert werden, daß die Achse der Schallkeule schräg auf die Bestandskante trifft. Dadurch treten bereits bei einem Abstand von ca. 1,0 m diffuse Reflexionen auf, die vom Sensor nicht mehr ausgewertet werden können. Alternativ zur geeigneten Anbringung des Sensors wurde versucht, die

Schallkeule durch einen fokussierenden Reflektor einzugrenzen. Durch diese zusätzliche Umlenkung werden die Ultraschallwellen aber derart geschwächt, daß bereits bei geringer Neigung der Bestandskante kein auswertbares Echo mehr am Sensor empfangen wird.

Wie die in **Bild 66** dargestellten Meßwertverläufe bei Variation der Relativgeschwindigkeit zwischen Sensor und Bestandskante zeigen, werden die Abstandsmessungen nicht durch die Fahrgeschwindigkeit beeinflusst.

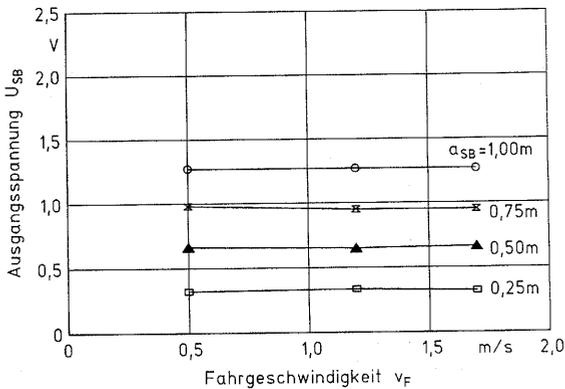


Bild 66: Einfluß der Fahrgeschwindigkeit v_F auf die Ausgangsspannung der Ultraschall-Abstandssensoren U_{SB} bei der Messung gegen Getreidehalme

Grundsätzliche Probleme bei der Anwendung von Ultraschall-Abstandssensoren zur Schnittbreitenmessung zeigten sich bereits in den Laborversuchen, wenn keine senkrecht ausgerichtete und scharf begrenzte Bestandskante vorlag. Da der Sensor den Abstand zu dem ersten innerhalb der Schallkeule erfaßten Objekt bestimmt, verfälschen bereits einzelne aus der Bestandskante hervorstehende Halme die Meßergebnisse. Außerdem wird auch deren Ausdehnung überbewertet, da die Schallwellen solange reflektiert werden, bis das Objekt die Schallkeule verläßt.

Die Störechos von alleinstehenden Halmen lassen sich in der Signalverarbeitung eliminieren, indem nur ein aus dem Verlauf der vorangegangenen Messungen zu erwartendes Signal akzeptiert wird und andernfalls das vorangegangene oder

das erwartete Signal übernommen wird. Ist der Abstand zwischen den hervorstehenden Halmen jedoch so gering, daß mehr als ein Halm innerhalb der Schallkeule liegt, oder ist die gesamte Bestandskante zum Sensor hin geneigt fällt die Abstandsmessung trotzdem zu gering aus.

Lücken in der Bestandskante mit einer Breite von 0,3 m, wie sie z.B. vorkommen, wenn der Bestand quer zur Richtung der Fahrgassen geerntet wird, werden von dem untersuchten Sensor nur dann erkannt, wenn dessen Abstand zur Bestandskante weniger als 0,2 m beträgt.

5.4.2 Feldversuche

5.4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Experimentelle Untersuchungen zur Schnittbreitenmessung unter praktischen Feldbedingungen wurden mit dem Versuchsmähdrescher während der Getreideernte durchgeführt. Um einen Vergleich der Meßergebnisse mit der tatsächlichen Schnittbreite zu ermöglichen, wurde an der im Bestand laufenden Schneidwerkskante der Spurreißer einer Sämaschine montiert, um so den Verlauf der Bestandskante im Boden zu markieren. Der Abstand zwischen der alten und der neuen Bestandskante entspricht der tatsächlichen Schnittbreite. Begrenzt wird die Genauigkeit der Schnittbreitenmessung im Feldeinsatz durch den Halmreihenabstand.

5.4.2.2 Ergebnisse

Bild 67 zeigt einen über einer abgesteckten Fahrstrecke von 20 m durchgeführten Vergleich zwischen der Schnittbreitenmessung mit den Ultraschall-Abstandssensoren und den Kontrollmessungen mit dem Spurreißer. Auf der ersten Hälfte der Fahrstrecke wurde der Abstand a_{SB} zum annähernd senkrecht stehenden Bestand bis auf ca. 1 m vergrößert, auf der zweiten Hälfte wieder bis auf den

ursprünglichen Abstand verringert. Der rechte Halmteiler lief bei diesem Versuch im Bestand, so daß sich die Schnittbreite b_S aus der Differenz zwischen der vollen Schneidwerksbreite und dem am linken Halmteiler gemessenen Abstand ergibt. Zur Berechnung der Fahrstrecke s_F sind die Signale der Radarsensoren verwendet worden.

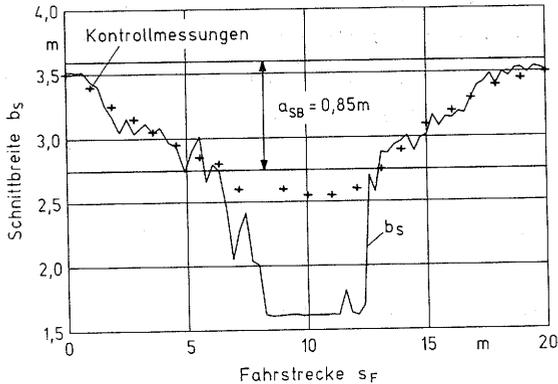


Bild 67: Ergebnisse der Schnittbreitenmessung mit Ultraschall-Abstandssensoren während eines Feldversuchs

Es zeigt sich, daß die Meßergebnisse unter Feldbedingungen bis zu einer Schnittbreite von 2,75 m, was einem Abstand von $a_{SB} = 0,85$ m zwischen Ultraschallsensor und Bestandskante entspricht, etwa im Bereich des vorliegenden Reihenabstands (0,12 m) von den Kontrollmessungen abweichen. Bei einer weiteren Vergrößerung des Abstands zur Bestandskante steigt die Abweichung dann sprungartig an. Werden keine reflektierten Signale mehr empfangen, schaltet der Sensor auf Überreichweite und setzt den Wert der Abstandsmessung auf 2 m. Zurückzuführen ist die gegenüber den Laborversuchen reduzierte Reichweite auf die Bewegung der Halme im Feld, die die Reflexion der Schallwellen zusätzlich behindert. Einflüsse von Temperaturänderungen und Staubbildung wurden nicht festgestellt.

Aufgrund der genannten Probleme wird deutlich, daß die Schnittbreitenmessung mit Ultraschall-Abstandssensoren nur dann befriedigende Ergebnisse liefert, wenn eine scharf begrenzte und senkrecht zum Boden ausgerichtete Bestands-

kante vorliegt. Knechtges [100] schlägt deshalb für die Anwendung von Ultraschall-Abstandssensoren zur automatischen Führung des Mähdreschers entlang der Bestandskante den Anbau eines Halmaufrichters an dem im Bestand laufenden Halmteiler vor. Aufgrund der geringen Steifheit der Getreidehalme sind im praktischen Einsatz jedoch Schwierigkeiten hinsichtlich der Funktionssicherheit einer derartigen Vorrichtung zu erwarten.

In der vorliegenden Arbeit werden Ertragsberechnungen nur dann durchgeführt, wenn der von den Ultraschallsensoren bestimmte Abstand zur Bestandskante weniger als 0,8 m beträgt. Durch dieses in die Datenkontrolle einbezogene Kriterium werden auch Teilflächen mit Lagergetreide von der Ertragsberechnung und -kartierung ausgeschlossen. Im stehenden Bestand liegen die durch hervorstehende Halme bedingten Abweichungen überwiegend im Bereich des Reihenabstands. Bei dem verwendeten 3,6 m breiten Schneidwerk entspricht dies einer Abweichung von ca. 3 %.

5.5 Bestimmung der Durchlaufzeiten

5.5.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Zur Bestimmung der Durchlaufzeiten, die den Zeitversatz zwischen der Aufnahme des Gutstroms am Schneidwerk und dem Erreichen und Ansprechen der Meßeinrichtungen beschreiben, wurden stationäre Untersuchungen im Labor durchgeführt. Der Versuchsmähdrescher wurde dazu mit dem Schneidwerk vor ein 25 m langes und 2 m breites Förderband gestellt, über das die Gutzufuhr erfolgte. Als Versuchsgut wurden eingelagerte Weizengarben verwendet, die mit den Ähren voran über eine Rutsche der Einzugsschnecke zugeführt wurden. Die Massenbelegung des Förderbands und dessen Geschwindigkeit bestimmten den Gesamtmassendurchsatz eines Versuchs. Zur Bestimmung des Korndurchsatzes wurde das Korn in die im Korntank des Versuchsmähdreschers installierte Wägeeinrichtung geleitet.

Zum Zeitpunkt t_0 , an dem das Gut nach dem Starten des Förderbands in das Schneidwerk einlief, wurde ein Kontrollsignal ausgelöst und gemeinsam mit den Signalen der Meßeinrichtungen aufgezeichnet. Die Abtastfrequenz betrug bei den Versuchen 10 Hz, so daß die Durchlaufzeiten mit einer Auflösung von 0,1 s bestimmt werden konnten.

5.5.2 Ergebnisse

In Bild 68 ist der charakteristische Verlauf der Dunkelzeit T_{D1} , die in die Berechnung des Kornvolumenstroms im Elevator eingeht, beim Beginn eines Versuchs dargestellt.

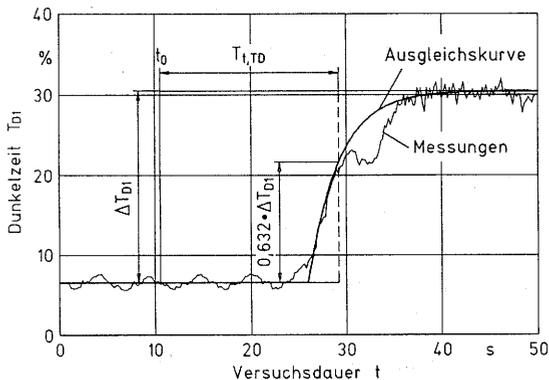


Bild 68: Charakteristischer Verlauf der Dunkelzeit T_{D1} bei sprunghörmiger Gutzufuhr (Winterweizen, $\dot{m}_{Ges} = 4,6 \text{ kg/s}$, $U_K = 12 \%$, $U_{NKB} = 12 \%$, $K:NKB = 1:0,85$)

Unter der Voraussetzung, daß das Band gleichmäßig belegt wurde, entspricht der Verlauf der Dunkelzeit der Systemantwort auf eine sprunghörmige Gutzufuhr (Übergangsfunktion). Die verwendete Ausgleichskurve für den Verlauf der Dunkelzeit entspricht dem Übertragungsverhalten eines Totzeitglieds mit Verzögerung erster Ordnung ($T_t T_1$) nach Bae u.a. [77].

Wie in Kap. 3.1 bereits beschrieben, werden in der vorliegenden Arbeit nur die Durchlaufzeiten, die sich aus der Summe der Totzeit und der Zeitverzögerung ergeben, zur Datenzuordnung auf den Schnitzeitpunkt berücksichtigt.

Entsprechend der Durchlaufzeit für die Volumenstrommessung im Kornelevator $T_{t,TD}$ werden auch die Durchlaufzeiten für die Kornfeuchtemessung in der Korn-tankbefüllschnecke $T_{t,UK}$ und für die Kornverlustmessung am Ausgang des Schüttlers $T_{t,VKS}$ und der Reinigungsanlage $T_{t,VKR}$ bestimmt.

Bild 69 zeigt, daß die Durchlaufzeiten mit steigendem Gesamtmassendurchsatz abnehmen, was durch eine entsprechende Verringerung des Schlupfes beim Guttransport erklärt werden kann.

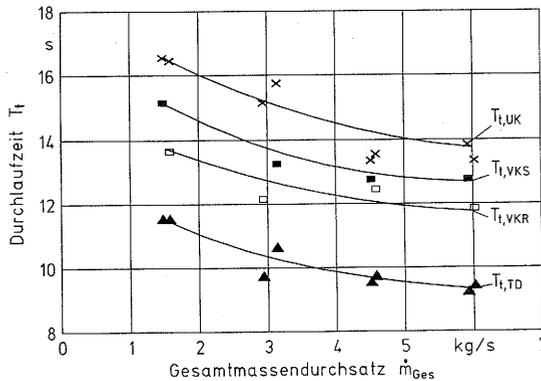


Bild 69: Abhängigkeit der Durchlaufzeiten T_t vom Gesamtdurchsatz \dot{m}_{Ges} (Winterweizen, $U_K = 12\%$, $U_{NKB} = 12\%$, $K:NKB = 1:0,85$)

Im untersuchten Durchsatzbereich variieren die Durchlaufzeiten $T_{t,TD}$ um 2,4 s, $T_{t,VKS}$ um 1,8 s, $T_{t,VKR}$ um 2,4 s und $T_{t,UK}$ um 2,9 s. Zur Datenzuordnung bei der Ertragsberechnung und -kartierung werden die mittleren Durchlaufzeiten verwendet, die entsprechend der Abtastrate bei der Datenerfassung auf volle Sekunden gerundet werden.

5.6 Betrachtung der Abweichungen bei der Ertragskartierung

Die Bestimmung des Kornertrags ist eine komplexe Meßaufgabe, bei der sich das Meßergebnis nach Gl.(4) aus den zuvor beschriebenen Eingangsteilmeßgrößen zusammensetzt.

Bei Kenntnis der Meßunsicherheiten der einzelnen Eingangsteilmeßergebnisse gilt nach dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz [107] für die absolute Abweichung des Gesamtmeßergebnisses:

$$(\Delta m_K'')^2 = \left(\frac{\partial m_K''}{\partial \dot{m}_K} \cdot \Delta \dot{m}_K \right)^2 + \left(\frac{\partial m_K''}{\partial v_F} \cdot \Delta v_F \right)^2 + \left(\frac{\partial m_K''}{\partial b_S} \cdot \Delta b_S \right)^2 + \left(\frac{\partial m_K''}{\partial U_K} \cdot \Delta U_K \right)^2 \quad (25)$$

Eine zuverlässige quantitative Abschätzung der Meßunsicherheiten mit den Methoden der Statistik erfordert eine größere Anzahl von Stichproben und Wiederholungsmessungen unter reproduzierbaren Bedingungen. Dies ist bei der Ertragskartierung jedoch nicht möglich, da die Erntebedingungen im Feld zeitlich und örtlich variieren.

Entsprechend ändern sich auch die systematischen und die zufälligen Abweichungen. Besonders bei der Ernte mit geringen Korndurchsätzen bzw. Fahrgeschwindigkeiten sind hohe relative Abweichungen zu beobachten, wie die Untersuchungen zum Einsatzverhalten der Meßeinrichtungen zeigen. Hierdurch bedingte Abweichungen in der Ertragsberechnung treten häufig örtlich konzentriert (z.B. beim Anschneiden des Bestands) auf, was in der Ertragskarte zu Fehlinterpretationen führen kann. Durch einen Ausschluß entsprechender Datensätze von der Ertragskartierung werden die tatsächlichen Ertragsunterschiede im Feld genauer wiedergegeben [108].

Die folgenden, aus den Untersuchungen zum Einsatzverhalten der Meßeinrichtungen abgeleiteten Kriterien werden deshalb in die Datenkontrolle einbezogen.

- Die DGPS-Ortungsergebnisse (B, L, H) werden mit denselben Satelliten berechnet (Positionskorrekturverfahren)
- Die DGPS-Positionsberechnung erfolgt über einen Zeitraum von mindestens 60 s mit wenigstens 4 Satelliten.
- Der Kornmassenstrom \dot{m}_K liegt über 1 kg/s.
- Die Fahrgeschwindigkeit v_F ist positiv.
- Die Abstände zwischen den Halmteilern und der Bestandskante betragen weniger als $a_{SB} = 0,8$ m.
- Die Signale der Kornverlustsensoren liegen unterhalb eines Grenzwerts von ca. 2,5 % Kornverlust.

Da die Datenzuordnung mit mittleren Durchlaufzeiten erfolgt und die Aufteilung des Kornstroms im Mähdrescher nicht berücksichtigt (vgl. Kap.3.1), geben die berechneten Kornerträge kleinräumige Variationen im Feld auch bei einer genauen Datenerfassung nicht exakt wieder. Insbesondere ergeben sich beim Anschneiden und Verlassen des Bestands sowie beim Anfahren und Anhalten im Bestand Probleme, die in der Befüll- und Entleerphase vorliegenden Korndurchsätze dem Zeitpunkt und der Position der Gutaufnahme zuzuordnen. Dies zeigt sich darin, daß Korndurchsatzmeßwerte \dot{m}_K auch Positionen außerhalb des Bestands ($b_S = 0$) und Standzeiten ($v_F = 0$) zugeordnet werden, so daß mit diesen Meßwerten keine Ertragsberechnung durchgeführt werden kann. In diesem Fall werden sowohl die vorherige als auch die nachfolgende Teilflächen-ertragsberechnung von der Ertragskartierung ausgeschlossen.

Qualitativ lassen sich lokale Abweichungen bei der Ertragskartierung abschätzen, indem die Ertragsmeßpunkte in Abhängigkeit vom Ernteablauf graphisch auf dem PC-Bildschirm dargestellt werden. Signifikante Ertragsunterschiede zwischen benachbarten Teilflächen, die sich bei Änderung des Ernteablaufs oder der Erntebedingungen ergeben, sind vorwiegend auf die Unvollkommenheit der Meßeinrichtungen und Datenzuordnung zurückzuführen.

6 Ertragskartierung

Zur Ertragskartierung während der Getreideernte wurden in den Jahren 1991 bis 1995 Feldversuche durchgeführt und die Daten der Meßeinrichtungen auf dem PC1 des Versuchsmähdreschers für die Weiterverarbeitung aufgezeichnet. Die Feldversuche in den Jahren 1991 und 1992 dienten hauptsächlich der schrittweisen Entwicklung und Optimierung der in Kap. 4 beschriebenen Meßeinrichtungen sowie deren Untersuchung unter praktischen Erntebedingungen. Feldversuche zur Ertragskartierung mit dem vollständig ausgerüsteten Versuchsmähdrescher (vgl. Kap. 4.6) wurden in den Jahren 1993 bis 1995 auf insgesamt 19 Versuchsflächen durchgeführt. Seit 1994 wurden die Kornerträge auch online auf dem PC2 kartiert und eine Ertragsvorausberechnung durchgeführt.

Der in Kap. 3.1 beschriebene Ablauf zur Erfassung von geokodierten Kornerträgen wird exemplarisch anhand eines ca. 4 ha großen Sommergerstebestands (Stockacker) dargestellt.

Bild 70 zeigt die Echtzeitverläufe der in die Ertragsberechnung eingehenden Meßgrößen bei der Ernte von zwei jeweils 235 m langen Fahrstrecken.

Alle dargestellten Meßgrößen wurden mit einer Abtastrate von 1 Hz aufgezeichnet. Im Verlauf der Schnittbreite b_S sind die Zeitpunkte, zu denen der Bestand angeschnitten und verlassen wurde, sowie die Leerfahrten zu erkennen. Beim Vergleich mit dem Verlauf des Kornmassenstroms \dot{m}_K wird der durch den Guttransport im Mähdrescher bedingte Zeitversatz zwischen der Gutaufnahme und der Erfassung des Kornvolumenstroms im Kornelevator deutlich.

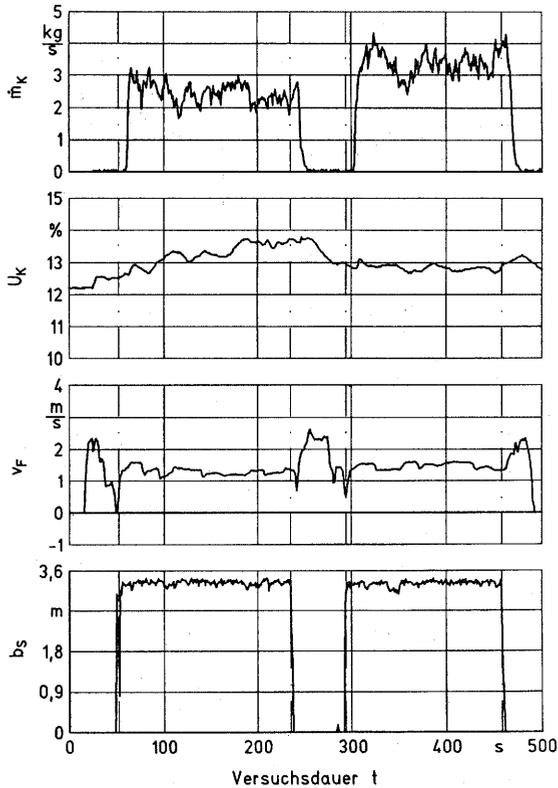


Bild 70: Echtzeitverläufe für Kornmassenstrom \dot{m}_K , Kornfeuchtegehalt U_K , Fahrgeschwindigkeit v_F und Schnittbreite b_S

Bei den im **Bild 71** dargestellten Zeitverläufen sind die Meßwerte für den Kornmassenstrom \dot{m}_K und den Kornfeuchtegehalt U_K unter Berücksichtigung der mittleren Durchlaufzeiten (vgl. Kap. 5.5) dem Zeitpunkt der Gutaufnahme zugeordnet worden. Erst nach dieser Datenzuordnung ist eine Berechnung des Kornertrags m_K zulässig. Für die online-Kartierung werden die Meßgrößen vor der Datenzuordnung und Ertragsberechnung deshalb solange in einem Durchgangsspeicher abgelegt, bis der Kornstrom die Kornfeuchtemeßeinrichtung passiert hat, da der Guttransport bis in die Korntankbefüllschnecke beim Versuchsmährescher die längste Durchlaufzeit benötigt.

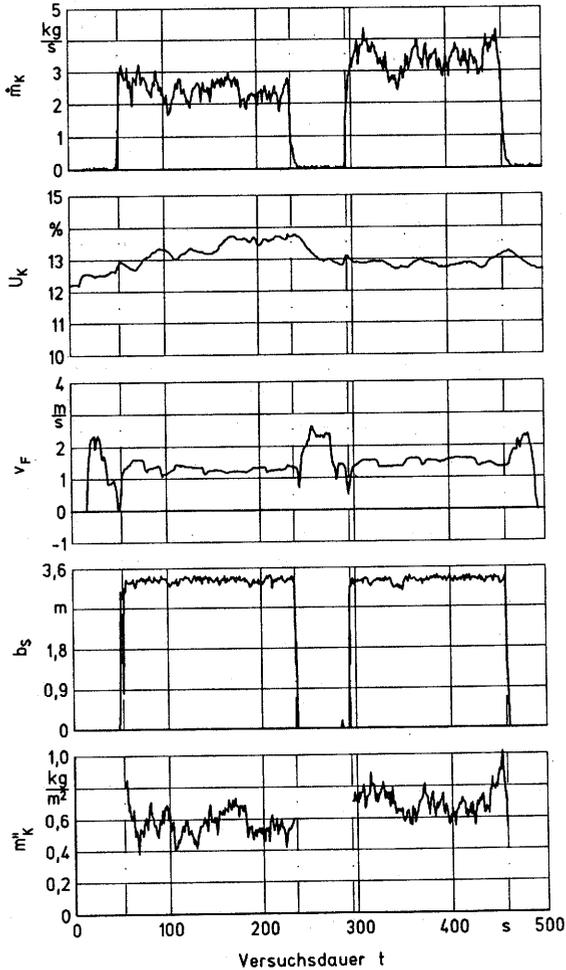


Bild 71: Zeitverläufe für Kornmassenstrom \dot{m}_K , Kornfeuchtegehalt U_K , Fahrgeschwindigkeit v_F , Schnittbreite b_S und Kornertrag m''_K nach der Datenzuordnung

Bild 72 zeigt die entsprechenden Verläufe der Meßwerte und des Kornertrags über der Fahrstrecke s_F aufgetragen.

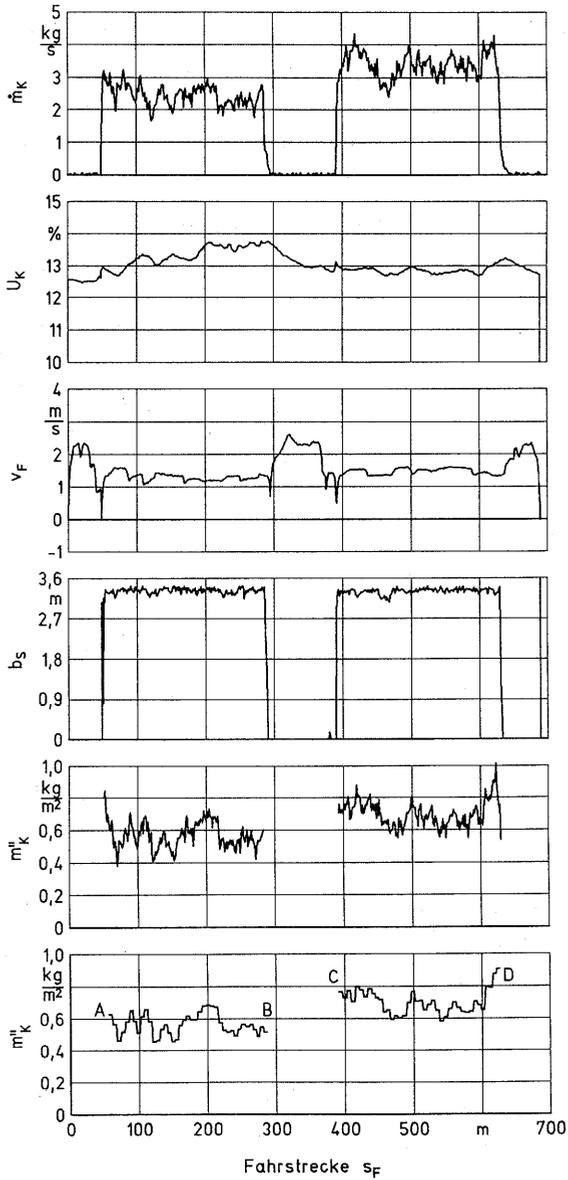


Bild 72: Kornmassenstrom \dot{m}_K , Kornfeuchtegehalt U_K , Fahrgeschwindigkeit v_F , Schnittbreite b_s und Kornertrag \ddot{m}_K über der Fahrstrecke s_F

Durch die Darstellung des Kornertrags über der Fahrstrecke werden die örtlichen Variationen der Meßgrößen und des berechneten Kornertrags wiedergegeben. Im unteren Diagramm sind die nach Überschreiten einer im Bestand zurückgelegten Fahrstrecke von 5 m berechneten Teilflächenenerträge dargestellt. Hierdurch wird der Verlauf des Kornertrags auch ohne Filterung der Meßwerte geglättet.

Die sich auf den Mittelpunkt der Teilflächen beziehenden DGPS-Ortungsergebnisse sind im **Bild 73** anhand der Bezeichnungen A bis D zu erkennen.

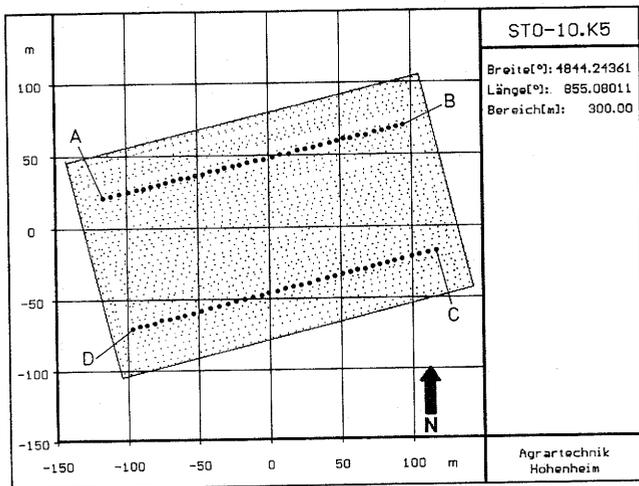


Bild 73: Positionen der Ertragsmeßpunkte ('Stockacker', 07.08.1993)

Nicht dargestellt sind die Positionen der Ertragsmeßpunkte, die durch die Datenkontrolle mit den in Kap.5.6 beschriebenen Kriterien von der Ertragskartierung ausgeschlossen wurden. Die Feldgrenzen sind aus den beim Umfahren des Feldes aufgezeichneten DGPS-Ortungsergebnissen bestimmt worden.

Die Feldfläche A_F läßt sich über die in Gl. (26) angegebene Gaußsche Flächenformel [109] aus den Koordinaten der Feldgrenzen x_{Fj} , y_{Fj} berechnen. Für das dargestellte Feld beträgt die berechnete Feldfläche $A_F = 3,93$ ha.

$$A_F = 0,5 \cdot \sum_{j=1}^n (x_{Fj} - x_{Fj+1}) \cdot (y_{Fj} + y_{Fj+1}) \quad (26)$$

Bei der online-Kartierung werden die Ertragsmeßpunkte oder die aus der tatsächlichen Fahrstrecke und Schnittbreite festgelegten Teilflächen auf dem Bildschirm des PC2 graphisch dargestellt. Durch eine an die unterschiedlichen Ertragsniveaus angepaßte farbige Darstellung lassen sich die örtlichen Variabilitäten innerhalb des Feldes bereits während des Erntevorgangs visualisieren. Nach Abschluß des Erntevorgangs können die gespeicherten Ertragsmeßpunkte mit Geographischen Informationssystemen weiterverarbeitet werden.

Bild 74 zeigt die Ertragskarte des Feldes Stockacker in Raster- und Konturflächendarstellung. Zur Erstellung der Rasterflächenkarte ist aus den Ertragsmeßpunkten, die sich innerhalb einer Rasterfläche mit der Seitenlänge von 10 m befinden, der arithmetische Mittelwert gebildet und der Position des Mittelpunkts dieser Rasterfläche zugeordnet worden. Die in der Konturflächenkarte dargestellten Isoertragsflächen sind durch eine Nachbarschaftsanalyse nach dem Verfahren der Triangulation aus den Ertragsmeßpunkten linear interpoliert worden [110]. Die Größe und Lage der Rasterflächen sowie die Einteilung in die Ertragsklassen sind variabel und somit an die Erfordernisse der Weiterverarbeitung (z.B. Fahrgassenabstand) anpaßbar. Über den Ertragsklassen ist jeweils der Anteil der zugeordneten Ertragsmeßpunkte angegeben.

Bemerkenswert an der dargestellten Ertragskarte sind die ansteigenden Korn-erträge im Bereich des westlichen, südlichen und östlichen Feldrands, wo das Feld durch Fahrwege begrenzt wird. Diese durch Kontrollmessungen bestätigte untypische Korn-ertragsausbildung konnte auf eine Überlappung bei der Düngung in diesen Bereichen zurückgeführt werden.

Bild 75 zeigt als Beispiel für die Kartierung weiterer Meßgrößen oder Bestandsmerkmale die Verteilung des Kornfeuchtegehalts. Da das Feld von außen nach innen abgeerntet wurde, nahm der Kornfeuchtegehalt aufgrund des tageszeit-abhängigen Trocknungsverlaufs tendenziell zur Feldmitte hin ab. Die sich im Bereich der Feldmitte deutlich hervorhebenden Flächen mit höheren Kornfeuchtegehalten wurden durch einen verstärkten Unkrautbesatz verursacht.

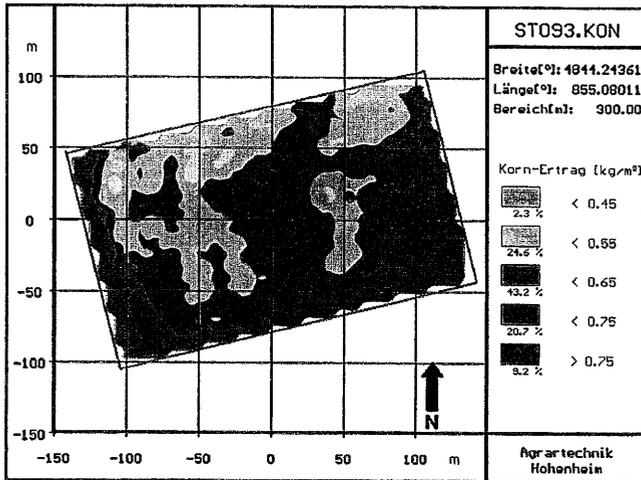
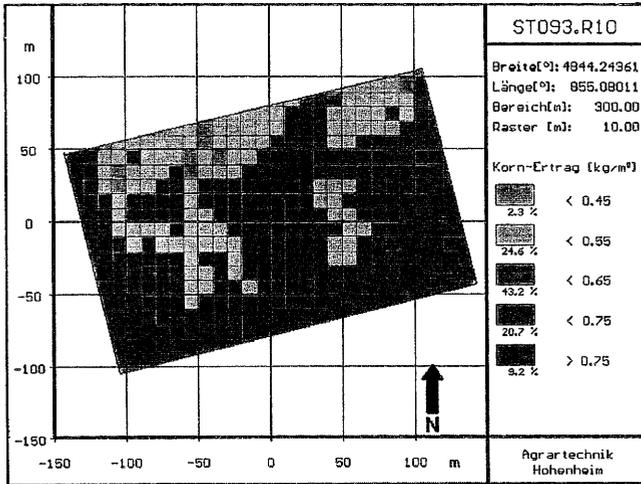


Bild 74: Ertragskarte in Raster- und Konturflächendarstellung ('Stockacker', SG 'Sissi', 07.08.1993)

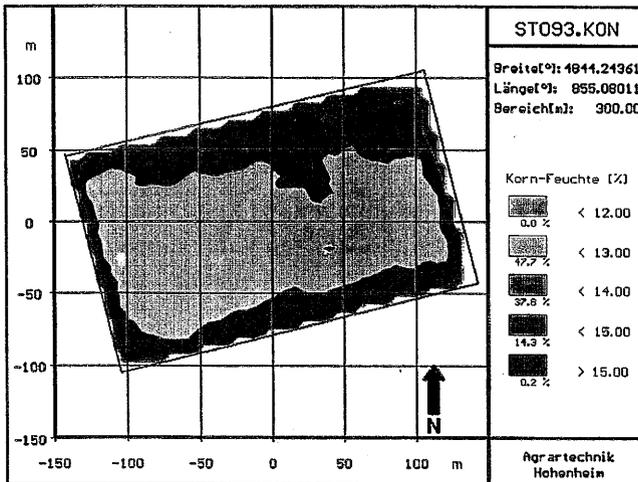
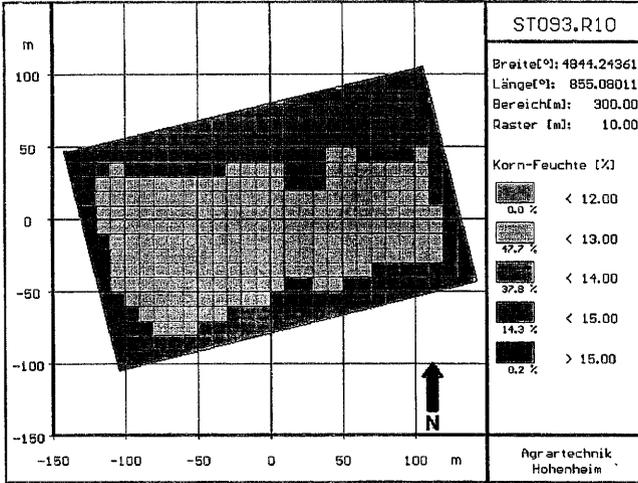


Bild 75: Feuchtegehaltsverteilungskarte in Raster- und Konturflächendarstellung ('Stockacker', SG 'Sissi', 07.08.1993)

7 Ertragsvorausberechnung

Anhand des bei der Ertragskartierung in Kap. 6 dargestellten Feldes 'Stockacker' wird auch das in Kap. 3.2 beschriebene Verfahren zur Regelung des Mähreischerbetriebs durch eine Ertragsvorausberechnung exemplarisch dargestellt.

Bild 76 zeigt den Vergleich zwischen dem vorausberechneten und dem tatsächlich gemessenen Kornertrag für drei Vorausberechnungsverfahren über der im Bestand zurückgelegten Fahrstrecke. In die Berechnungen gehen alle bereits kartierten Ertragsmeßpunkte ein, deren über Gl. (8) bestimmte Entfernung zur Position der Vorausberechnung P_3 nicht mehr als $r_V = 12$ m beträgt. Um einen direkten Vergleich der Ergebnisse zu ermöglichen, beträgt die Entfernung $s_V = 0$ m, so daß die aktuelle Position P_2 und die Position P_3 , für die die Vorausberechnung durchgeführt wird, identisch sind (vgl. Bild 19).

Als erster Ansatz wird aus allen in die Vorausberechnung eingehenden Ertragsmeßpunkten nur der der Position P_3 am nächsten gelegene Meßpunkt ausgewertet. Der vorausberechnete Kornertrag entspricht dadurch dem gemessenen Kornertrag der direkt benachbarten, bereits abgeernteten Reihe. Datenzuordnungsfehler und nicht berechenbare Kornertragsänderungen, die z.B. durch Säfehler oder Fahrgassen hervorgerufen wurden, werden durch das Verfahren 'Nächster Meßpunkt' nicht kompensiert.

Im zweiten Ansatz wird der arithmetische Mittelwert aus allen in die Vorausberechnung eingehenden Ertragsmeßpunkten nach Gl. (27) gebildet, um mehrere Ertragsmeßpunkte in der Vorausberechnung zusammenzufassen.

$$m_{K,V}'' = \frac{\sum_{i=1}^n m_{K_i}''}{n} \quad (27)$$

Hierdurch werden die Kornertragsspitzen geglättet, was die tatsächlichen Variationen im Feld besser wiedergibt. Bei kleinräumigen Veränderungen führt das Verfahren 'Arithmetischer Mittelwert' jedoch zu höheren Abweichungen.

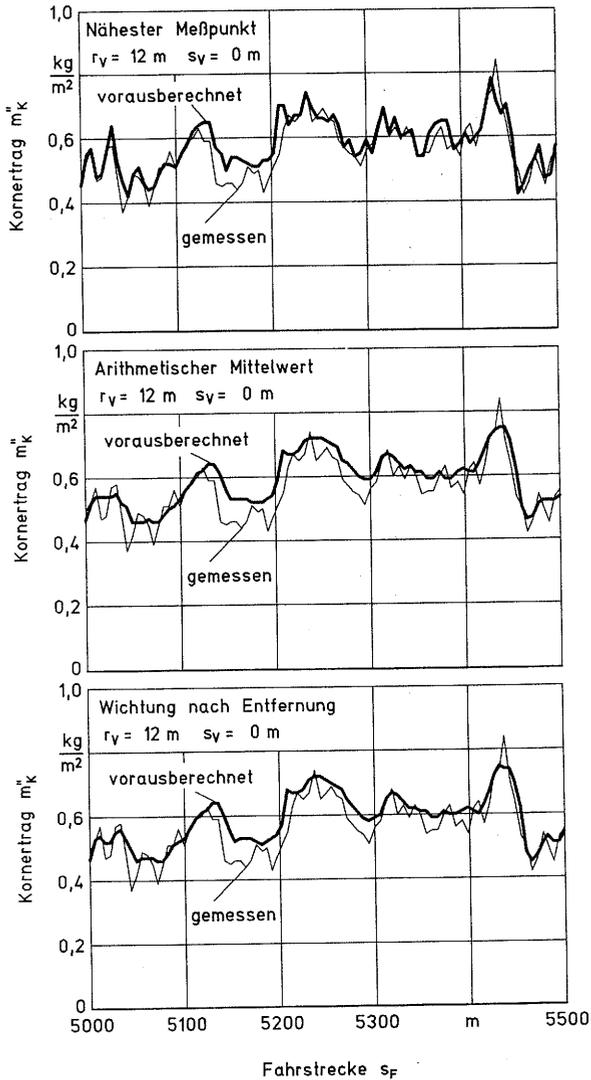


Bild 76: Verfahren zur Ertragsvorausberechnung

Im dritten Ansatz werden die in die Berechnung eingehenden Ertragsmeßpunkte P_i entsprechend ihrer Entfernung r_i zur Position P_3 nach **Gl. (28)** gewichtet, wobei der näheren Ertragsmeßpunkte stärker gewichtet werden.

$$m_{K,V}^{II} = \sum_{i=1}^n \frac{m_{Ki}^{II}}{r_i} \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i} \right)^{-1} \quad (28)$$

Im Vergleich zum Verfahren 'Arithmetischer Mittelwert' zeigt das Verfahren 'Wichtung nach Entfernung' nur geringe Verbesserungen. Zudem wirken sich Abweichungen in der Positionsbestimmung direkt im Ergebnis der Vorausberechnung aus. Dies gilt auch für Extrapolationsverfahren und die Einbeziehung der Ertragsänderungsrichtung. Die folgenden Vorausberechnungen werden deshalb nach dem Verfahren 'Arithmetischer Mittelwert' durchgeführt.

Bild 77 zeigt den Einfluß des Radius r_V auf die Ertragsvorausberechnung.

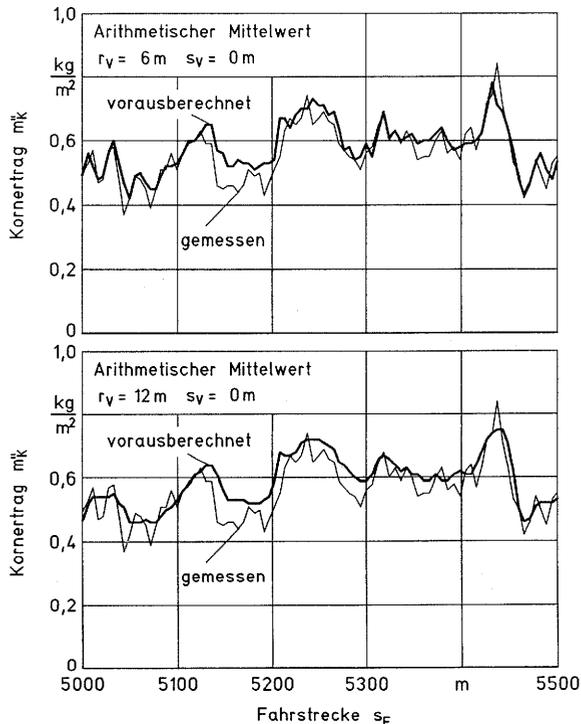


Bild 77: Einfluß des Radius r_V auf die Ertragsvorausberechnung

Wie bereits der Vergleich zwischen den Verfahren 'Nächster Meßpunkt' und 'Arithmetischer Mittelwert' im Bild 76 zeigte, werden die Kornertragsspitzenwerte mit zunehmender Anzahl der in die Vorausberechnung eingehenden Meßpunkte stärker kompensiert.

Im Bild 78 ist der Einfluß der Entfernung s_V auf die Ertragsvorausberechnung dargestellt.

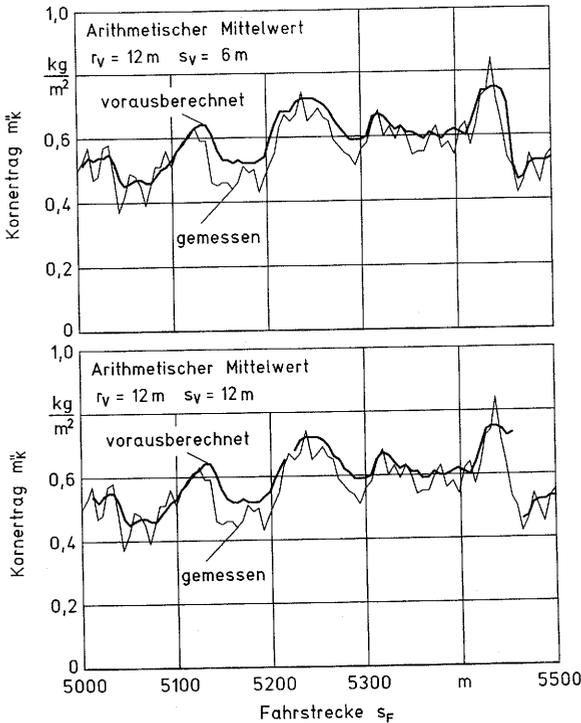


Bild 78: Einfluß der Entfernung s_V auf die Ertragsvorausberechnung

Da sich die Vorausberechnung und die Messung hier nicht auf dieselben Positionen beziehen ($P_2 \neq P_3$), sind die vorausberechneten Kornerträge entsprechend der Entfernungen s_V in Fahrtrichtung verschoben worden. Hierdurch ist ein direkter Vergleich möglich. Dieser zeigt, daß die Vorausberechnung durch die

Entfernung s_V nur geringfügig beeinflusst wird, sofern die Fahrtrichtung über diese Entfernung konstant gehalten wird. Bei der Vorausberechnung in einer Entfernung von $s_V = 12$ m werden beim Einfahren in den Bestand zunächst keine bereits kartierten Ertragsmeßpunkte gefunden, wodurch die Unterbrechungen im Verlauf des vorausberechneten Kornertrags begründet sind.

Die Positionen der in einer Entfernung von $s_V = 12$ m nach Gl. (6) vorausberechneten Ertragsmeßpunkte sind in **Bild 79** dargestellt. Vorausberechnete Positionen, denen im Radius $r_V = 12$ m keine kartierten Ertragsmeßpunkte zugeordnet werden konnten, sind nicht aufgezeichnet worden. Bei einem Vergleich mit den im Bild 73 dargestellten Positionen der kartierten Ertragsmeßpunkte sind die Bereiche zu erkennen, in denen der Mähdrescher an den Wendeflächen in den Bestand hineinfuhr. Weiterhin zeigt der Vergleich, daß die Ertragsvorausberechnung beim Anschneiden des Bestands an den Feldgrenzen selbstverständlich keine Ergebnisse liefert.

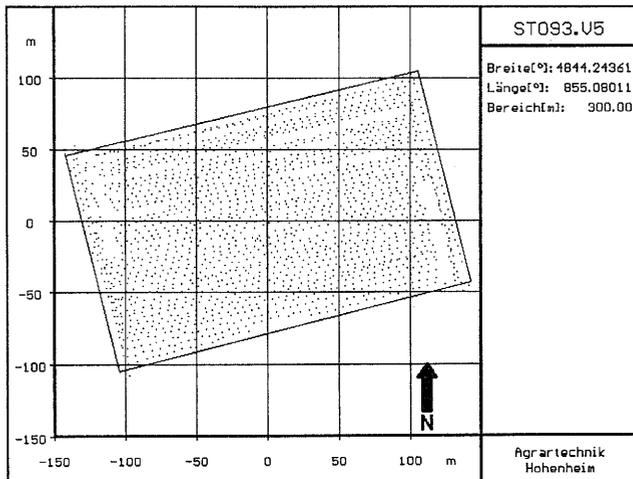


Bild 79: Positionen der vorausberechneten Ertragsmeßpunkte ($r_V = 12$ m, $s_V = 12$ m) ('Stockacker', SG 'Sissi', 07.08.1993)

Bild 80 zeigt die aus den vorausberechneten Ertragsmeßpunkten erstellte Ertragskarte des Feldes 'Stockacker' in Raster- und Konturfächendarstellung.

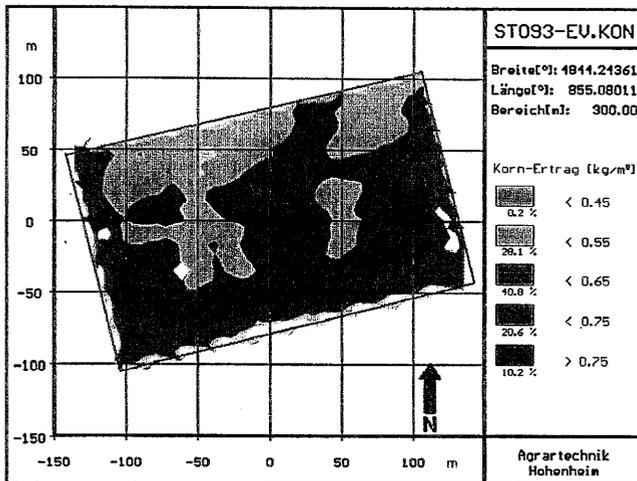
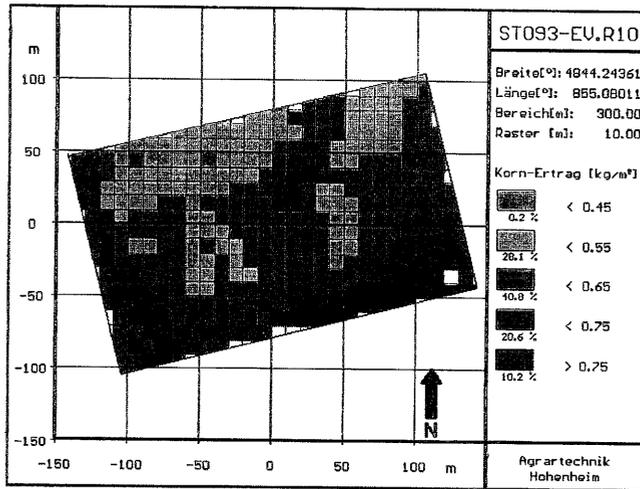


Bild 80: Vorausberechnete Ertragskarte in Raster- und Konturfächendarstellung ($r_v = 12 \text{ m}$, $s_v = 12 \text{ m}$) ('Stockacker', SG 'Sissi', 07.08.1993)

Ein Vergleich mit der in Bild 74 dargestellten Ertragskarte, die aus den kartierten Meßpunkten nach denselben Verfahren (10 m-Raster, Triangulation) erstellt wurde, zeigt eine gute Übereinstimmung in Bezug auf die Ertragsverteilung und die Lage der Isoertragsflächen. Eine Bestimmung von kleinräumigen Ertragsvariationen im Bereich der durch den Radius r_v festgelegten Ausdehnung ist mit dem beschriebenen Vorausberechnungsverfahren jedoch nicht möglich.

Wenn es gelingt, das Verfahren zur Vorausberechnung des Kornertrags mit ähnlichen Abweichungen auf den Gesamt- oder NKB-Ertrag zu übertragen, kann dadurch ein 'vorausschauendes' Mähdrescher-Regelungssystem zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit entwickelt werden.

8 Ausblick

Die teilflächenspezifische Feldbewirtschaftung ist ein Konzept, das in Zukunft besonders auf Großbetrieben und auch im überbetrieblichen Maschineneinsatz einen verbreiteten Einsatz finden wird. Die Nachfrage nach Erfassungssystemen für geokodierte Daten zeigt sich bereits in dem zunehmenden Angebot an Ertragskartierungseinrichtungen für Mähdrescher. Während die verschiedenen Hersteller zur Ortung fast ausschließlich die Satellitenortung mit DGPS einsetzen, werden zur Korndurchsatzmessung unterschiedliche Meßverfahren angewendet. Zur Steigerung der Genauigkeit bei der Berechnung der Flächenleistung sollte zukünftig auch die Messung der tatsächlichen Schnittbreite einbezogen werden. Um das Informationsnetz über lokale Variabilitäten innerhalb eines Feldes kontinuierlich auszubauen, werden neben der Kartierung des Kornertrags beim Mähdrusch entsprechende Systeme für weitere Erntearbeiten [111 bis 114], die Bodenbearbeitung [115], die Bodenbeprobung [116] und die Unkrautkartierung [117] untersucht.

Die Übertragung und Verarbeitung der anfallenden großen Datenmengen stellt neue Anforderungen an die Hard- und Software. Eine bidirektionale online-Datenübertragung zwischen den mobilen Arbeitsmaschinen und dem stationären Betriebscomputer ermöglicht die Einbindung des Bordcomputers in ein überregionales Datennetz. Hierdurch lassen sich die erfaßten Daten ohne Zwischenspeicherung direkt weiterverarbeiten, wobei auf verschiedene Datenbanken zugegriffen werden kann. Die erzeugten teilflächenspezifischen Handlungsempfehlungen können vor der Bearbeitung abgerufen und bei Bedarf während des Arbeitsgangs aktualisiert werden. Entsprechende Kommunikationssysteme stehen bereits zur Verfügung. Es bleibt zu überprüfen, welche technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für ihren sinnvollen Einsatz in der Landwirtschaft erfüllt sein müssen.

Forschungsbedarf besteht weiterhin auf dem Gebiet der Verarbeitung von geokodierten Teilflächendaten zu entsprechenden Handlungsanweisungen für die Feldbewirtschaftung. Die bereits vorgestellten Programme konzentrieren sich

hauptsächlich auf die Düngung. Detaillierte pflanzenbauliche und bodenkundliche Erkenntnisse über kleinräumige Düngestrategien werden sich aus den Ergebnissen bereits laufender mehrjähriger Praxisversuche zur teilflächenspezifischen Düngung ableiten lassen und in die Programmentwicklung einfließen. Entsprechendes gilt auch für die Saat, die Pflege, den Pflanzenschutz und die Bodenbearbeitung. Es muß auch geklärt werden, ob die Aufteilung des gesamten Feldes in Bezug auf Art, Größe und Lage der Teilflächen einheitlich oder an die Feldgröße, die Arbeitsbreite der nachfolgenden Bewirtschaftungsmaßnahmen oder die Variationsbreite der entscheidenden Flächenmerkmale angepaßt werden soll.

Die Umsetzung von teilflächenspezifischen Handlungsempfehlungen wurde für die Verteilarbeiten Düngung und Pflanzenschutz bereits realisiert. Zur gezielten Applikation wurden auf dem Markt befindliche Systeme zur Überwachung und Steuerung der Ausbringmenge über einen Bordcomputer mit DGPS kombiniert. Werden die Steuerbefehle jedoch erst beim Einfahren in die differenziert zu behandelnden Teilflächen abgerufen, ist die Applikationsgenauigkeit von der Dynamik der Verstelleinrichtungen abhängig [118]. Durch die Berücksichtigung der Steuerbefehle, die sich auf die vor der Arbeitsmaschine liegenden Teilflächen beziehen, lassen sich die Applikationsvorgaben genauer umsetzen.

Durch das vorgestellte Verfahren zum Betrieb des Mähdreschers mit geokodierten Teilflächendaten sollen die Regelungseinrichtungen zur Automatisierung des Mähdrusches verbessert werden. Nachdem die Durchführbarkeit der online-Vorausberechnung des Kornertrags unter Praxisbedingungen in der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden konnte, ist die Vorausberechnung des NKB-Ertrages zu untersuchen, da dieser das Betriebsverhalten des Mähdreschers weit aus mehr als der Kornertrag beeinflusst. Zur Untersuchung der 'vorausschauenden' Einstellung in Bezug auf eine Steigerung der Mähdrescherkapazität müssen vergleichende Feldversuche durchgeführt werden. Dazu sollte die Einstellung der Fahrgeschwindigkeit und der Arbeitsorgane nicht manuell sondern automatisiert durchgeführt werden. Die benötigten Meß- und Regelungseinrichtungen sind auf Mähdreschern der oberen Leistungsklasse bereits weitgehend vorhanden.

9 Literatur

- [1] Wacker, P. und H.D. Kutzbach: Dresch- und Trenneinrichtungen moderner Mähdrescher. Landtechnik 47 (1992) H. 6, S. 268/271.
- [2] Kutzbach, H.D.: Mähdrescher. Jahrbuch Agrartechnik 6, Frankfurt, 1993, S. 129/136.
- [3] Hald, J.A.: Kommunikation zwischen PC und mobiler Elektronik. KTBL-Arbeitspapier 196 Landwirtschaftliches BUS-System - LBS, KTBL, Darmstadt, 1993, S. 87/98.
- [4] Schnug, E. und R. Junge: Strukturierung des Interpretationsmoduls und Konzeption des LORIS (Local Resource Information System) für die Anwendung im "Computer Aided Farming" (CAF). KTBL-Arbeitspapier 175 Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft, KTBL, Darmstadt, 1994, S. 150/154.
- [5] Schumacher, J.A. and D.P. Froehlich: Spatially Control and Field Operations via Laptop. ASAE-Paper No. 90-1590.
- [6] Vansichen, R. and J. De Baerdemaeker: Continuous Wheat Yield Measurement on a Combine. Proceedings of the ASAE Symposium 'Automated Agriculture for the 21st Century', Chicago (USA), 1991, S. 346/355.
- [7] Stafford, J.V., B. Ambler and M.P. Smith: Sensing and Mapping Grain Yield Variation. Proceeding of the ASAE Symposium 'Automated Agriculture for the 21st Century', Chicago (USA), 1991, S. 356/365.
- [8] Beuche, H. und H.J. Hellebrand: Ortung in der Landwirtschaft - Ansätze für eine praxisorientierte Ortungslösung zur teilschlagspezifischen Bewirtschaftung. Landtechnik 48 (1993) H. 4, S. 195/197.
- [9] Hellebrand, H.J. and H. Beuche: Positioning Systems for Agricultural Field Operations. Int. Agrophysics (1994) H. 8, S. 581/584.
- [10] Muhr, T. und H. Auernhammer: Technische Möglichkeiten zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge im Feld. VDI/MEG-Kolloquium Landtechnik H. 14 Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge, VDI-Gesellschaft Agrartechnik, Düsseldorf, 1992, S. 49/56.
- [11] Reitz, P. und H.D. Kutzbach: Technische Komponenten für die Erstellung von Ertragskarten während der Getreideernte mit dem Mähdrescher. VDI/MEG-Kolloquium Landtechnik H.14 Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge, VDI-Gesellschaft Agrartechnik, Düsseldorf, 1992, S. 91/105.
- [12] Reitz, P. and H.D. Kutzbach: Measurement Techniques for Yield Mapping during Grain Harvesting with Combines. Proceedings of the XXV CIO-STA-CIGR V Conference, Wageningen (Niederlande), 1993, S. 48/54.

- [13] Zingery, W.L., N.M. Dulles and J.E. Tatzem: Inertial Sensors for Agricultural Applications. Agricultural Electronics - 1983 and beyond. Proceedings of the National Conference on Agricultural Electronics Applications, Chicago (USA), 1983, S. 319/326.
- [14] Bernhardt, G. und W. Damm: Lösungsansätze zur Positionsbestimmung mobiler Landmaschinen mittels eines Trägheitsnavigationssystems. VDI/MEG-Kolloquium Landtechnik H.14 Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge, VDI-Gesellschaft Agrartechnik, Düsseldorf, 1992, S. 57/70.
- [15] Hartl, P.: Die Wende in der Navigation - Orientierung an Satelliten. Wechselwirkungen Jahrbuch 1986, Aus Forschung und Lehre der Universität Stuttgart, S. 3/15.
- [16] Gordon, R.P. and R.G. Holmes: Laser Positioning System for Off-Road Vehicles. ASAE-Paper No. 88-1603.
- [17] Smulevich, I., G. Zeltzer and A. Brunfeld: Laser Scanning Method for Guidance of Field Machinery. Transactions of the ASAE 32 (1989) Nr. 2, S. 425/430.
- [18] Holmquist, R.: A Laser-Optic Navigation System. Proceedings of the International Symposium on Locating Systems for Agricultural Machines, Gödöllő (Ungarn), 1991.
- [19] Monod, M.O.: Localization of Agricultural Machines. Proceedings of the International Symposium on Locating Systems for Agricultural Machines, Gödöllő (Ungarn), 1991.
- [20] Schueller, J.K. and Y.H. Bae: Spatially Attributed Automatic Combine Data Acquisition. Computers and Electronics in Agriculture H. 2, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (Niederlande), 1987, S. 119/127.
- [21] Palmer, R.J.: Progress Report of a Local Positioning System. Proceeding of the ASAE Symposium 'Automated Agriculture for the 21st Century', Chicago (USA), 1991, S. 403/408.
- [22] Wagner, L.E. and M.D. Schrock: Field Experiences with LORAN-C for Positioning Agricultural Machinery. ASAE-Paper No. MCR 86-113.
- [23] Kahmen, H.: Vermessungskunde II, Winkel- und Streckenmeßgeräte, Polygonierung, Triangulation und Trilateration, Satellitengeodäsie. De Gruyter, Berlin, 1986.
- [24] Wells, D.: Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick (Kanada), 1986.

- [25] Hoßfeld, B.: Absehbare Entwicklungen bei GPS und rechtliche Voraussetzungen. VDI/MEG-Kolloquium Landtechnik H. 14 Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge, VDI-Gesellschaft Agrartechnik, Düsseldorf, 1992, S. 77/82.
- [26] Monzel, F.G.: Grundlagen DGPS. (Near) Realtime Differential GPS-Anwendungen, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, Düsseldorf, 1990, S. 17/48.
- [27] Jahns, G. u. H. Kögl: Satellitensysteme zur Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge - Ein Beitrag zur Technikfolgenabschätzung. Landbauforschung Völkenrode 43 (1993), H. 2/3, S. 125/148.
- [28] Auernhammer, H.: Einsatz und Anwendung der Satellitenortung und Satellitennavigation in der Landwirtschaft. KTBL-Arbeitspapier 233 Aktuelle Arbeiten aus Landtechnik und landwirtschaftlichem Bauwesen, KTBL, Darmstadt, 1996, S. 58/64.
- [29] Lechner, W.: NAVSTAR GPS and GLONASS - Competitors or Initial Elements of a Future Global Satellite Navigation System. SPN-Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation 1 (1992) H. 1, S. 8/14.
- [30] Grimm, A.: LORAN-C und GPS - zwei Ortungssysteme für Europa. SPN - Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation 1 (1992) H. 4, S. 126/131.
- [31] Schwäble, R.: DGPS als Sensor in einem hybriden System. (Near) Realtime Differential GPS-Anwendungen, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, Düsseldorf, 1990, S. 75/99.
- [32] Haverland, M. und T. Jacob: Vermessung von ILS-Leitstrahlensystemen mittels integriertem Navigationssystem. (Near) Realtime Differential GPS-Anwendungen, Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation, Düsseldorf, 1990, S. 109/123.
- [33] Gilles, E.D., M. Faul, U. Kabatek und M. Sandler: Automatisierung des Schiffsverkehrs auf Wasserstraßen. atp - Automatisierungstechnische Praxis 35 (1993) H. 10, S. 543/552.
- [34] Eimer, M.: Untersuchungen zur Durchsatzregelung am Mähdrescher. Habilitationsschrift Universität Göttingen, 1973.
- [35] Schueller, J.K.: The Current Status of Automation on Self-Propelling Grain Combines Manufactured in North-America. Agri-Mation 1, ASAE 1985, S. 306/311.
- [36] Dymnic, V.G.: Die Automatisierung des Getreidemähdreschers (Orig. russ.). Mechanizacija i elektrificajacija 14 (1956) Nr. 4, S. 46/84.

- [37] Bogdanova, L.I.: Elektromagnetischer Belastungsregler für die Regelung der Halmgutzufuhr zum Dreschwerk des selbstfahrenden Mähdreschers Typ SK-3 (Orig. russ.). *Mechanizacija i élekrificajacija* 19 (1961) Nr. 3, S. 39/41.
- [38] Friesen, O.H., G.C. Zoerb, and F.W. Bigsby: Automatic Feedrate Control of Combines, ASAE-Paper No. 65-167.
- [39] Diekhans, N.: Automatisierung am Mähdrescher. *Grundlagen der Landtechnik* 35 (1985) H. 4, S. 111/118.
- [40] Klassen, N.D., R.J. Wilson, S.N. Pang and J.N. Wilson: Feedrate Measurement in Combine Harvesters. ASAE-Paper No. 93-1011.
- [41] De Baerdemaeker, J., R. Delcroix and P. Lindemans: Monitoring the Grain Flow on Combines. *Agri-Mation* 1, ASAE 1985, S. 329/338.
- [42] Kutzbach, H.D.: Entwicklungstendenzen bei der Regel- und Informationstechnik am Mähdrescher. *VDI/MEG-Kolloquium Landtechnik Bd. 6 Mähdrescher*, VDI-Fachgruppe Landtechnik, Düsseldorf, 1988, S. 121/133.
- [43] Borgelt, S.C. and K.A. Sudduth: Grain Flow Monitoring for In-Field Yield Mapping. ASAE-Paper No. 92-1022.
- [44] Fischer, W.E.: Die Stahldrescher. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure* 76 (1932) Nr. 16, S. 383/390.
- [45] Howard, K.D., J.L. Pringle, M.D. Schrock, D.K. Kuhlman and D.L. Oard: An Elevator-Based Combine Grain Flow Sensor. ASAE Paper No.93-1504.
- [46] Pringle, J.L., M.D. Schrock, R.D. Hinnen, K.D. Howard and D.L. Oard: Yield Variations in Grain Crops. ASAE Paper No. 93-1505.
- [47] Wagner, L.E. and M.D. Schrock : Grain Flow Measurement with a Pivoted Auger. *Transactions of the ASAE* 30 (1987) Nr. 6, S. 1583/1586.
- [48] Wagner, L.E. and M.D. Schrock: Yield Determination Using a Pivoted Auger Flow Sensor. *Transactions of the ASAE* 32 (1989) Nr. 2, S. 409/413.
- [49] Sörlin, S.: Teknik för mängdbestämning. *Meddelande Nr. 407*, Swedish Institute of Agricultural Engineering, 1985.
- [50] Searcy, S.W., J.K. Schueller, Y.H. Bae, S.C. Borgelt and B.A. Stout: Mapping of Spatially Variable Yield During Grain Combining. *Transactions of the ASAE* 32 (1989) Nr. 3, S. 826/829.
- [51] Dammer, S.: Erste Ergebnisse zur Durchsatzmessung mit dem Claydon-Meßgerät unter Praxisbedingungen. *Tagungsband 6. Dresdener Landtechnisches Kolloquium '20 Jahre Mähdrescherforschung an der TU Dresden'*, 1991, S. 185/197.

- [52] Auernhammer, H. und M. Demmel: Lokale Ertragsermittlung beim Mähdrusch. Landtechnik 48 (1993) H. 6, S. 315/319.
- [53] Auernhammer, H., M. Demmel, K. Muhr, J. Rottmeier and K. Wild: Yield Measurement on Combine Harvesters. ASAE-Paper No. 93-1506.
- [54] Stott, B.L., S.C. Borgelt and K.A. Sudduth: Yield Determination Using an Instrumented Claas Combine. ASAE-Paper No. 93-1507.
- [55] Pfeiffer, D.W., J.W. Hummel and N.R. Miller: Real-Time Corn Yield Sensor. ASAE-Paper No. 93-1013.
- [56] N.N.: Ceres 2 Grain Yield Meter Installation Instructions, RDS Technologie Ltd., Nailsworth Gloucestershire (U.K), 1994.
- [57] Heidemann, R. und G. Stolpe: Meßprinzip und Meßverfahren zur Ermittlung des momentanen Korndurchsatzes im Mähdrescher. Agrartechnik 36 (1986) Nr. 10, S. 451/452.
- [58] Hooper, A.W. and B. Ambler: A Combine Harvester Discharge Meter. Journal of Agricultural Engineering Research 24 (1979) H. 1, S. 1/10.
- [59] Auernhammer, H.: Elektronik in Traktoren und Maschinen: Einsatzgebiete, Funktion, Entwicklungstendenzen. BLV München, Wien, Zürich, 1989.
- [60] Schueller, J.K., M.P. Mailander and G.W. Krutz: Combine Feedrate Sensors. Transactions of the ASAE 28 (1985) Nr. 1, S. 2/5.
- [61] Strubbe, G.J., B. Missotten and J. De Baerdemaeker: A Friction Compensated Mass Flow Measurement for Bulk Solids. Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering, Madrid (Spanien), 1996, Paper 96B-005.
- [62] Böttinger, S.: Regelkonzepte für die Mähdrescher-Reinigungsanlage. VDI/MEG-Kolloquium Landtechnik Bd. 6 Mähdrescher, VDI-Fachgruppe Landtechnik, Düsseldorf, 1988, S. 157/170.
- [63] Friedrich, C.: Neues Verfahren zur kontinuierlichen Verwiegung von Schüttgütern. Die Mühle + Mischfuttertechnik 122 (1985) H. 10, S. 124/126.
- [64] Jost, G.: Meßsystem zum kontinuierlichen Wägen von Schüttgütern. Sonderdruck aus chemie-anlagen + verfahren Nr.11 (1987).
- [65] Thoustrup, A., S. Haneklaus und E. Schnug: Möglichkeiten der kontinuierlichen Erfassung, Speicherung und Auswertung von Ertragsdaten bei der Beerntung von Mähdruschfrüchten. KTBL-Arbeitspapier 175 Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft, KTBL, Darmstadt, 1994, S. 170/174.

- [66] Yang, W.: Kapazitive Durchsatzmessung auf Mähdreschern. Kurzfassung der Vorträge zur VDI/MEG-Tagung 'Landtechnik', Freising-Weihenstephan, 1992, S. 37/39.
- [67] Adam, H.: Entwicklung und theoretische und experimentelle Untersuchung eines Meßverfahrens zur kontinuierlichen Messung des Korndurchsatzes im Mähdrescher. Dissertation Technische Universität Dresden, 1990.
- [68] Böttinger, S.: Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage in Mähdreschern. Dissertation Universität Stuttgart, VDI-Fortschr.-Ber. Reihe 14, Nr. 66, Düsseldorf, 1993.
- [69] Bischoff, L.: Messung von Körnerströmen im Mähdrescher. Tagungsband 6. Dresdener Landtechnisches Kolloquium '20 Jahre Mähdrescherforschung an der TU Dresden', 1991, S. 227/232.
- [70] Herlitzius, Th. und W. Schütze: Experimentelle Untersuchungen am Mähdrescher unter Verwendung eines Multisensorregelsystems. Tagungsband 6. Dresdener Landtechnisches Kolloquium '20 Jahre Mähdrescherforschung an der TU Dresden', 1991, S. 233/240.
- [71] Vansichen, R. and J. De Baerdemaeker: Measuring the Actual Cutting Width of a Combine by means of an Ultrasonic Distance Sensor. Proceedings of the International Scientific Conference 'Trends in Agricultural Engineering' Vol. II, Prag (Tschechoslowakei), 1992, S. 615/621.
- [72] Schönfelder, G. und H. Niproschke: Bestimmung der Bestandhöhe beim Mähdrusch. Landtechnik 49 (1994) H. 3, S. 160/161.
- [73] Kirk, T.G., D.W. Campbell, W.D. Pickering, G.W. Stanley, G.J. Schoenau and J.N. Wilson: Evaluation of a Simulation Modell of the Combine Harvester. Proceedings of the International Conference on Grain and Forage Harvesting, Ames/Iowa (USA), 1977, S. 134/138.
- [74] Campbell, D.W.: Modelling the Combine Harvester. Dissertation Universität Saskatchewan (Kanada), 1980.
- [75] Huisman, W.: Optimum Cereal Combine Harvester Operations by means of Automatic Machine and Threshing Speed Control. Dissertation Universität Wageningen (Niederlande), 1983.
- [76] Mailander M. and G. Krutz: Development of a Dynamic Model of a Combine Harvester in Corn. ASAE-Paper No. 84-1588.
- [77] Bae, Y.H., S.C. Borgelt, S.W. Searcy, J.K. Schueller and B.A. Stout: Determination of Spatially Variable Yield Maps. ASAE-Paper No.87-1533.
- [78] Beck, T.: Meßverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher. Dissertation Universität Stuttgart, Fortschr.-Ber. VDI Reihe 14, Nr. 54, Düsseldorf, 1991.

- [79] Kühn, G.: Zur Durchsatzregelung bei Mähdreschern. Deutsche Agrartechnik 19 (1969) H. 8, S. 353/358.
- [80] Fekete, A.: Automatic Feedrate Control of Harvesting Machines. Tagungsbericht zum 10. Internationalen Kongress des CIGR, Nr. 3, Budapest, 1984, S. 658/665.
- [81] EP 0 347 979: Combine Ground Speed Control. European Patent Office, 1993.
- [82] DD 288 085: Verfahren zur Regelung der Fahrgeschwindigkeit und der Arbeitsorgane im Mähdrescher nach der Zuflußdichte der Gutmasse. Deutsches Patentamt, 1991.
- [83] GB 1 577 525: Method and Apparatus for Measurement of Plant Density for the Control of Harvest Machines. British Patent Office, 1980.
- [84] Wacker, P.: Laboruntersuchungen an konventionellen Mähdreschern mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler. Unveröffentlichter Versuchsbericht Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, 1988.
- [85] Büermann, M.: Untersuchungen zum Einfluß der geometrischen Zuordnung der Förder- und Trennelemente auf das Abscheideverhalten von Tangentialdreschwerken. Dissertation Universität Stuttgart, 1996, (z.Zt. noch nicht veröffentlicht).
- [86] Bischoff, L., T. Herlitzius und G. Bernhardt: Untersuchung der Masseströme im Mähdrescher - ein Beitrag zur experimentellen Prozeßanalyse. Kurzfassung der Vorträge zur VDI/MEG-Tagung 'Landtechnik', Freising-Weihenstephan, 1992, S. 33/36.
- [87] Haneklaus, S.: Das modulare Konzept von CAF. KTBL-Arbeitspapier 175 Elektroneinsatz in der Außenwirtschaft, KTBL, Darmstadt, 1994, S. 135/137.
- [88] WO 86/05353: Agricultural Husbandry. World Intellectual Property Organisation, 1986.
- [89] EP 0 181 308: Method and Apparatus for Spreading Fertilizer. European Patent Office, 1991.
- [90] Kühnbauch, W.: Fernerkundung in der Landwirtschaft. Luft- und Raumfahrt (1990) H. 4, S. 36/45.
- [91] Amon, H.: FuE-Vorhaben "Elektronik in der Außenwirtschaft" - Ergebnisse aus dem Bereich Software und Pflanzenbau. KTBL-Arbeitspapier 175 Elektroneinsatz in der Außenwirtschaft, KTBL, Darmstadt, 1994, S. 34/85.
- [92] Straub, J.: Differentielles GPS, der Schlüssel zur hochgenauen Positionsbestimmung. Vortrag auf dem VDI/MEG-Kolloquium Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge, Freising-Weihenstephan, 1992.

- [93] Schulze-Lammers, P., P. Boeker, H. Hoogen und M. Ohsmann: Genaue Positionsbestimmung, GPS mit differentieller Korrektur über Radio Data System (RDS). Landtechnik 50 (1995) H. 2, S. 72/73.
- [94] N.N.: MX 4200D Differential GPS Receiver Technical Reference Manual, Magnavox Advanced Products and Systems Company, Torrance/California (USA), 1990.
- [95] Offenlegungsschrift DE 3045728 A1: Fahrzeug mit Elevator, insbesondere selbstfahrender Mähdrescher. Deutsches Patentamt, 1982.
- [96] Böttinger, S.: Durchsatzbestimmung für die Regelung der Mähdrescher-Reinigungsanlage. Proceedings of the Eleventh International Congress on Agricultural Engineering Vol. 3, Dublin, 1989, S. 1857/1862.
- [97] N.N.: Combine Calc-U-Dri Grain Moisture Monitor, Owners Manual, David Manufacturing Company, Mason City/Iowa (USA), 1991.
- [98] Fichtel, H. und O. Balcarek: Vergleichende Untersuchungen von Radargeräten zur Geschwindigkeitsmessung an Landmaschinen. Grundl. Landtechnik 36 (1986) H. 3, S. 68/73.
- [99] N.N.: DjRVSII Radar Velocity Sensor Installation Instructions. Dickey-John Corporation, Auburn/Illinois (USA), 1985.
- [100] Knechtges, H.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Traktor und Gerät. Dissertation Universität Aachen, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) Nr. 194, 1991.
- [101] N.N.: Ultraschall-Abstandssensoren Serie 942 Geräteinformation E101, Honeywell Regelsysteme GmbH, Offenbach, 1991.
- [102] N.N.: RTKernel Realtime Multitasking Kernel für Turbo Pascal, Benutzerhandbuch Version 2.2, OnTime Informatik GmbH, Hamburg, 1992.
- [103] Lohmar, F.J. und H. Fröhlich: TROJA - Transformationsoperationen jeglicher Art. Benutzerhandbuch, Universität Gesamthochschule Essen, 1991.
- [104] Reitz, P.: Erstellung von Ertragskarten während der Getreideernte mit dem Mähdrescher. Arbeitsbericht zum Forschungsvorhaben DFG Ku 480/11-2, Universität Hohenheim, Institut für Agrartechnik, 1995, unveröffentlicht.
- [105] Prairie Agricultural Machinery Institute (PAMI): Calc-U-Dri Combine Moisture Meter. Evaluation Report 701, Humboldt (Kanada), 1993.
- [106] Scherer, R. und H.D. Kutzbach: Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten. Grundl. Landtechn. 28 (1978) H. 1, S. 6/12.
- [107] Beitz, W. und K.H. Küttner: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 18. Auflage, Berlin, 1995, S. W4/W5.

- [108] Thylén, L. and D.P.L. Murphy: The Control of Errors in Momentary Yield Data from Combine Harvesters. *Journal of Agricultural Engineering Research* 64 (1996) H. 4, S. 271/278.
- [109] Kahmen, H.: *Vermessungskunde I, Fehlerlehre, Vermessungen und Berechnungen für großmaßstäbige Karten und Pläne, Nivellieren*. De Gruyter, Berlin, 1986.
- [110] N.N.: SURFER 5.0 Surface Mapping System, Golden Software Inc., Golden/Colorado (USA), 1994.
- [111] Auernhammer, H.: Yield Measurement on Self-Propelling Forage Harvesters. ASAE-Paper No. 95-1757.
- [112] Ehlert, D. und H. Schmidt: Ertragskartierung mit Feldhäckslern. *Landtechnik* 50 (1995) H. 4, S. 204/205.
- [113] Wild, K. und H. Auernhammer: Automatisierte Prozeßdatenerfassung in Erntemaschinen. VDI-Berichte Nr. 1211, Darmstadt, 1995, S. 233/236.
- [114] Hien, P. und K.-H. Kromer: Sensortechnologie zur Ertragsbestimmung und Ertragskartierung von Zuckerrüben. VDI-Berichte Nr. 1211, Darmstadt, 1995, S. 187/190.
- [115] Paul, W.: FuE-Vorhaben "Elektronik in der Außenwirtschaft" - Zugkraftmessungen zur Teilschlagkartierung. KTBL-Arbeitspapier 175 Elektronik-einsatz in der Außenwirtschaft, KTBL, Darmstadt, 1994, S. 115/117.
- [116] Jürschik, P. und J. Schnerler: Teilflächenspezifische Düngung in großen Landwirtschaftsunternehmen. VDI-Berichte Nr. 1211, Darmstadt, 1995, S. 131/134.
- [117] Gerhards, R., M. Sökefeld und W. Kühbauch: Unkraut mit der Linse erkennen. *DLG-Mitteilungen* (1996) H. 1, S. 52/53.
- [118] Schueller, J.K. and M.W. Wang: Spatially-Variable Control of Field Machinery Integrating Control Theory and a GIS. International Conference on Agricultural Engineering, Uppsala (Schweden), 1992, Paper No. 920607.

ISSN 0931-6264