

Fachgebiet für Technik im Pflanzenbau  
der Technischen Universität München

**Untersuchungen zur Integration  
kontinuierlich arbeitender Feuchtemeßsysteme  
in ausgewählte Futtererntemaschinen**

**Georg Kormann**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät  
Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.- Prof. Dr. Dr. h.c. (AE Keszthely) J. Schön

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.- Prof. Dr. H. Auernhammer  
2. apl. Prof. Dr. H. Schwanghart  
3. Prof. Dr. Ir. Josse De Baerdemaeker,  
Catholic University Leuven / Belgien  
(schriftliche Beurteilung)

Die Dissertation wurde am 18.05.2001 bei der  
Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan  
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt  
am 16.11.2001 angenommen.

© 2001 by Landtechnik Weihenstephan

ISSN-Nr.: 0931-6264

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

Selbstverlag im Eigenvertrieb:  
Lehrstuhl Landtechnik Weihenstephan  
Am Staudengarten 2  
85350 Freising

Druck und Einband: Druckerei City Print GmbH, Nürnberg

---

Herrn Markus Peterreins  
(† 01.10.1999)

Während meiner Arbeit an diesem Projekt standen mir viele Menschen mit Rat und Tat zur Seite, bei denen ich mich ganz herzlich bedanken möchte.

In erster Linie danke ich Herrn Prof. Dr. H. Auernhammer für die Überlassung des Themas, die Gesamtbetreuung der Arbeit und die Hilfestellung bei der Abfassung der Dissertation. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H. Schwanghart und Prof. Dr. Ir. J. De Baerdemaeker für die Übernahme der Koreferate sowie Herrn Prof. Dr. Dr. hc. (AE) J. Schön für den Prüfungsvorsitz. Großer Dank gebührt zudem Herrn Dr. Markus Demmel, der durch seine allzeit verfügbare Unterstützung und offene Diskussionsbereitschaft wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Ebenso möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Landtechnik Weihenstephan bedanken. Namentlich seien erwähnt: Herr M. Berchthold, Frau G. Schneider, Herr J. Dallinger, Herr F. Bauer, Herr B. Neumair, Herr H. Brunnhuber, Herr T. Schwenke, Herr K. Stadler und Herr M. Wildgruber.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der John Deere Werke Zweibrücken – allen voran bei Herrn Dr. P. Pirro, der dieses Projekt mit initiiert hat, Herrn A. Giani, Herrn H. Ohlemeyer, Herrn H.J. Nissen, Herrn A. Rutz, Herrn W. Flohr und Frau G. Koch.

Weiter möchte ich mich bei den Landwirten sowie den Mitarbeitern des Staatsgutes Dürnast bedanken, die die Feldversuche mit begleiteten und Flächen zur Verfügung stellten. Im einzelnen möchte ich erwähnen: Familie M. Wachinger, Familie G. Kratzl, Herrn Dr. K. Walter, Herrn A. Wübbels und Herrn A. Bloier. In diesem Zusammenhang gilt mein besonderer Dank den Herren Dr. Josef Rottmeier und Nikolaus Rottmeier, die einen wesentlichen Beitrag bei der Umsetzung der Meßtechnik und Instandhaltung der Maschinen geleistet haben.

Die große Zahl an Probenmaterial und die Vielseitigkeit der Versuchsanlagen verdanke ich der KWS und ihren Mitarbeitern. Bedanken möchte ich mich namentlich bei Herrn Dr. F. Jäger, Herrn Herbert Forster, Herrn J. Böhm, Herrn E. Bommer, Herrn Hans Forster, Herrn G. Meisinger und Herrn H.J. Hartmetz.

Bedanken möchte ich mich zudem bei Landmaschinen Sedlmaier für den hervorragenden Service an den Maschinen. Persönlich möchte ich Frau B. Sedlmaier, Herrn K. Sainer, Herrn E. Horsch, Herrn J. Nitzel, Herrn J. Haselbeck und Frau B. Kretschmer nennen.

Ein besonders herzliches Dankeschön gebührt den studentischen Hilfskräften, die mit viel Geduld und Ausdauer zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Erwähnen möchte ich hier Herrn D. Auernhammer, Herrn F. Auernhammer, Frau A. Barunke, Herrn O. Hahnenkamm, Herrn Christian Köth, Frau S. Riedel, Frau M. Schraml und Frau S. Zitzmann. Erinnern möchte ich an Herrn Markus Peterreins, der das Ende dieser Arbeit leider nicht erleben durfte. Er hat viele Impulse in die Arbeit eingebracht.

Abschließend möchte ich mich bei der Firma John Deere bedanken, die dieses Projekt finanziert hat. Weiterer Dank gilt den Firmen Ingenieurbüro Rottmeier, MESA Electronic GmbH, Arnold Vertriebs GmbH, Liebherr-Mischtechnik GmbH, Perten Instruments GmbH, EG&G Berthold GmbH&Co.KG, Hydronix Ltd., pro/M/tec Theisen GmbH, Strandberg Eng., Rütter & Co. b.v. und CAESAR Datensysteme GmbH, die Unterstützung im Bereich von Sensorik und Meßtechnik geleistet haben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Frau Claudia für die Begleitung und all die Unterstützung während meiner Arbeit.

Weihenstephan, im Mai 2001

Georg Kormann

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>Abkürzungen und Symbole</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Die Notwendigkeit der Qualitätskontrolle	1
1.2 Fehlende Informationen in der Futtererzeugung	2
<b>2 Stand des Wissens</b>	<b>3</b>
2.1 <b>Physikalische Eigenschaften des Meßgutes</b>	<b>3</b>
2.1.1 Eigenschaften des Wassers	3
2.1.2 Wasserbindungen in Feststoffen	4
2.1.3 Einflußfaktoren auf die Feuchtebestimmung	6
2.2 <b>Begriffsdefinitionen für die Feuchtemessung</b>	<b>7</b>
2.3 <b>Verfahren zur Feuchtemessung in Feststoffen</b>	<b>9</b>
2.3.1 Trockenschränkverfahren	11
2.3.2 Leitfähigkeitsmessung	12
2.3.3 Dielektrische Messung	12
2.3.4 Kapazitives Meßverfahren	14
2.3.5 Mikrowellenmeßverfahren	16
2.3.6 Infrarotmeßverfahren	17
2.3.7 Kernresonanzverfahren	19
2.3.8 Kernstrahlungsverfahren	20
2.3.9 Zusammenstellung der relevanten Feuchtemeßverfahren	21
2.4 <b>Bekannte Feuchtemeßverfahren für Futtermüter</b>	<b>23</b>
<b>3 Zielsetzung</b>	<b>27</b>
<b>4 Material und Methoden</b>	<b>29</b>
4.1 <b>Feuchtigkeit als Qualitätsmerkmal von Ernteprodukten</b>	<b>30</b>
4.2 <b>Spezifikation der Futtererntemaschinen</b>	<b>31</b>
4.2.1 Materialfluß und Anbaumöglichkeiten im Feldhäcksler	31

---

4.2.2	Materialfluß und Anbaumöglichkeiten in der Rundballenpresse	35
<b>4.3</b>	<b>Anforderungen an die Feuchtemessung</b>	<b>37</b>
<b>4.4</b>	<b>Auswahl geeigneter Sensortechnik</b>	<b>40</b>
4.4.1	Einsetzbare Feuchtemeßsysteme	40
4.4.2	Verfügbare Feuchtemeßsysteme	41
<b>4.5</b>	<b>Aufbau eines Testprogramms für Feuchtesensoren</b>	<b>44</b>
4.5.1	Prüfstandversuche an ruhendem Material	45
4.5.2	Prüfstandversuche mit bewegtem Gut	52
4.5.3	Praxisversuche	53
4.5.4	Verfahren zur Probenahme	58
<b>4.6</b>	<b>Hard- und Software für die Datenverarbeitung</b>	<b>60</b>
<b>4.7</b>	<b>Versuchsauswertung</b>	<b>62</b>
4.7.1	Auswertung der Meßergebnisse	62
4.7.2	Berechnung der Gesamtfeuchte	65
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>67</b>
<b>5.1</b>	<b>Ergebnisse der Laboruntersuchungen</b>	<b>68</b>
5.1.1	Mikrowellenreflexionssysteme	69
5.1.2	Mikrowellentransmissionssysteme	73
5.1.3	NIR-Systeme	74
5.1.4	Kapazitive Feuchtemeßsysteme	84
<b>5.2</b>	<b>Ergebnisse der Feldversuche</b>	<b>90</b>
5.2.1	Genauigkeitsuntersuchung der Durchsatzermittlung mit dem radiometrischen Meßsystem	90
5.2.2	Vergleich der Probenahmeverfahren	93
5.2.3	Ergebnisse der NIR- Feuchtemeßsysteme	95
5.2.4	Ergebnisse der kapazitiven Feuchtemeßsysteme	103
<b>6</b>	<b>Diskussion und Schlußfolgerung</b>	<b>111</b>
<b>6.1</b>	<b>Einordnung der Ergebnisse</b>	<b>111</b>
6.1.1	Bewertung der Versuche zur Feuchtemessung im Labor	112
6.1.2	Bewertung der Feldversuche zur Durchsatzermittlung	115
6.1.3	Bewertung der Probenahme bei Feldversuchen	115
6.1.4	Bewertung der Praxisversuche zur Feuchtemessung	116
<b>6.2</b>	<b>Verfahrenstechnische Einordnung</b>	<b>118</b>
<b>6.3</b>	<b>Weiterführende Arbeiten</b>	<b>121</b>

---

---

<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>123</b>
<b>8</b>	<b>Summary</b>	<b>127</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>135</b>
<b>10.1</b>	<b>Anhang Material und Methoden</b>	<b>135</b>
10.1.1	Theoretische Bewertung der Feuchtemeßverfahren	135
10.1.2	Übersicht der verfügbaren Feuchtemeßsysteme	141
10.1.3	Berechnungen für die schichtdickenabhängigen Versuche	144
10.1.4	Aufbereitung der Daten von den Feldversuchen	145
<b>10.2</b>	<b>Anhang Ergebnisse</b>	<b>146</b>
10.2.1	Einzelergebnisse Franz Ludwig H <sub>2</sub> O	146
10.2.2	Einzelergebnisse Strandberg Type 6711	147
10.2.3	Einzelergebnisse MESA MM55	148
10.2.4	Einzelergebnisse Rütter Quadra Beam 6500	151
10.2.5	Einzelergebnisse Litronic FMS System	152
10.2.6	Überprüfung der Sortenunabhängigkeit	154
<b>10.3</b>	<b>Darstellung der Informationen in Ertragskarten</b>	<b>156</b>





## Abbildungsverzeichnis

Nr.	Seite
1	Aufbau des Dipolmoleküls Wasser. 4
2	Ersatzschaltbild der Leitfähigkeitsmessung. 12
3	Ersatzschaltbild der dielektrischen Messung. 13
4	Ersatzschaltbild der kapazitiven Messung. 14
5	Plattenformen bei elektronischen Meßverfahren. 15
6	Mögliche Anordnungen für die Feuchtemessung mit Mikrowellen. 16
7	Grundaufbau eines NIR- Feuchtemeßgerätes und Absorptionsspektrum eines Meßgutes. 18
8	Orientierung der Dipolmomente. 19
9	Prinzipieller Aufbau eines $\gamma$ -Strahlen Feuchtemeßsystems. 20
10	Projektplan „Feuchtemessung in Futtererntegütern“. 29
11	Aufbau eines selbstfahrenden Feldhäckslers. 32
12	Bereiche des Materialflusses im Feldhäckslers. 32
13	Schichtdicke im Auswurfkamin in Abhängigkeit von Dichte und Durchsatz bei einer Materialgeschwindigkeit von 100 km/h. 33
14	Materialfluß und Sensorpositionen in der Rundballenpresse. 35
15	Allgemeine Definitionsgrößen für einen Feuchtesensoraufbau. 45
16	Versuchsaufbau für den Strandberg Type 6711 Mikrowellen- feuchtesensor. 47
17	Versuchsaufbau für Mikrowellentransmissionssysteme. 48
18	Versuchsaufbau für NIR- Feuchtemeßsysteme (MESA MM55). 50
19	Versuchsaufbau für kapazitive Meßsysteme. 51
20	Prüfstandaufbau für Tests mit bewegtem Material. 53
21	Versuchsaufbau am selbstfahrenden Feldhäckslers. 54
22	Struktur der Datenerfassung auf dem Feldhäckslers. 55
23	Versuchsaufbau an der Rundballenpresse. 56
24	Feuchtesensoreinbau in der Rundballenpresse (1998). 57
25	Struktur der Datenerfassung an der Rundballenpresse. 57

26	Probenahme am Feldhäcksler.	59
27	Bildschirmanzeige MicroLab Yieldmonitor.	60
28	Festlegung der zulässigen relativen Abweichung.	62
29	Schema zur Bewertung von Meßergebnissen aus Praxisversuchen.	63
30	Aufbau eines Materialstromes.	65
31	Zunahme der Materialdichte in Abhängigkeit von der Feuchte.	68
32	Abweichungen der Meßwerte in Abhängigkeit von der Schichtdicke für den Sensor FL H <sub>2</sub> O.	70
33	Ergebnisse der Meßbereichsuntersuchung des FL H <sub>2</sub> O.	70
34	Ermittlung einer Korrekturformel zur Versuchsreihe Mais 3.	72
35	Korrigierte Ergebnisse der Versuchsreihe Mais 3.	73
36	Laboraufbau des MESA MM55 1997.	75
37	Ergebnisse des MESA MM55 aus Mais 2 nach Neukalibrierung.	76
38	Ergebnisse des MESA MM55 aus Mais 3 nach Neukalibrierung.	77
39	Ergebnisse des MESA MM55 aus Gras 4 nach Neukalibrierung.	78
40	Ergebnisse des MESA MM55 aus Mais 4 nach Neukalibrierung.	79
41	Überlagerte Spektren des Perten DA7000 von 67 Proben Maissilage.	80
42	Laborergebnisse Perten DA 7000 aus 67 Proben Maissilage.	81
43	Ergebnisse des Perten DA7000 von der Stickstoffgehaltsbestimmung von Grasproben im Labor.	82
44	Korrigierte Ergebnisse des Rütter Quadra Beam aus Mais 3.	84
45	Schichtdicken- und Dichteabhängigkeit der Meßergebnisse der Arnold FSV Sonde bei Mais.	85
46	Rohzählwerte Litronic FMS verglichen mit Trockenschrankwerten.	87
47	Ergebnisse Litronic FMS nach Neukalibrierung mit zwei Geraden.	88
48	Abweichung des Litronic FMS Feuchtemeßsystems in Abhängigkeit von Dichte und Schichtdicke.	89
49	Aufbau des radiometrischen Durchflußmeßsystems.	90
50	Ergebnisse des radiometrischen Systems aus Streifenversuchs.	91
51	Ergebnisse des radiometrischen Systems aus Parzellenversuch.	92
52	Vergleich der Feuchtwerte bei Probenahme aus Auswurfkamin und Anhänger.	94
53	Materialverteilung im Auswurfkamin.	94

---

54	Anbaupositionen des MESA MM55 Meßkopfes.	95
55	Meßwerte MM55 bei sauberer und verschmutzter Optik.	96
56	Zusammenhang zwischen Durchsatz und Korrekturfaktor.	100
57	Ergebnisse der Praxisversuche 1999 mit dem MESA MM55.	101
58	Ergebnisse der Feuchtemessung mit dem Perten DA 7000.	102
59	Ergebnisse der Feldversuche 1999 mit dem Arnold FSV 2.	104
60	Einfluß der Stellung des Auswurfkrümmers auf das Meßergebnis des Arnold FSV 2.	105
61	Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und Durchsatz.	108
62	Verlauf der Feuchte-meßwerte der drei Litronic FMS Feuchtesensoren in der Rundballenpresse für einen Ballen Grassilage (1998).	109
63	Einflußfaktoren auf die Bewertung von Meßergebnissen.	114
64	Feuchtekarte der Silomaisernte in Holzheim 1998.	120
65	Logarithmischer Kalibrieransatz für das Litronic FMS System basierend auf der Versuchsreihe Mais 5.	152
66	Genauigkeit des MESA MM55 1998 sortiert nach Sorten.	154
67	Genauigkeit des Litronic FMS 1998 nach Sorten.	155
68	Frischmasse-Ertragskarte der Silomaisernte 1998 in Holzheim.	156
69	Trockenmasse-Ertragskarte der Silomaisernte 1998 in Holzheim.	157



## Tabellenverzeichnis

<b>Nr.</b>		<b>Seite</b>
1	Die Wassergehaltsmeßverfahren für feste Stoffe.	10
2	Einflußfaktoren auf die technisch relevanten Feuchtemeßverfahren.	22
3	Bekannte Feuchtemeßsysteme für Erntegüter.	23
4	Liste der verfügbaren Feuchtemeßsysteme für Futtererntemaschinen.	24
5	Patentschriften über Feuchtemessung in Futtererntemaschinen.	25
6	Beschaffenheit der Erntegüter zum Bergezeitpunkt.	30
7	Bewertung von Materialstrom und Anbaumöglichkeiten von Sensoren am Feldhäcksler.	34
8	Bewertung der Anbaumöglichkeiten an der Rundballenpresse.	36
9	Anforderungsliste.	38
10	Theoretische Eignung der Meßverfahren.	40
11	Typische Eigenschaften einsetzbarer Feuchtemeßverfahren.	42
12	Liste der getesteten Feuchtemeßsysteme.	43
13	Ziele und Inhalte des Prüfplanes für Feuchtemeßsysteme.	44
14	Anbaudefinition der eingesetzten Mikrowellenreflexionssysteme.	48
15	Anbaudefinition der eingesetzten Mikrowellentransmissionssysteme.	49
16	Anbaudefinition der eingesetzten NIR- Systeme.	50
17	Anbaudefinition der eingesetzten kapazitiven Meßsysteme.	52
18	Ergebnisse des Vergleiches der Probenahmeverfahren.	93
19	Ergebnisse der Praxisversuche 1 mit dem MESA MM55 (1998).	98
20	Ergebnisse der Praxisversuche 2 mit dem MESA MM55 (1998).	99
21	Ergebnisse der Inhaltsstoffbestimmung mit Perten DA7000.	102
22	Ergebnisse der Praxisversuche 1 mit dem Litronic FMS (1998).	106
23	Ergebnisse der Praxisversuche 2 mit dem Litronic FMS (1998).	107
24	Ergebnisse der Feldversuche 1998.	117
25	Bewertung der elektrischen Verfahren.	136
26	Bewertung der Mikrowellenverfahren.	137
27	Bewertung des TDR-Verfahrens und der Nahinfrarotverfahren.	138

---

28	Bewertung der radiometrischen Verfahren.	139
29	Übersicht über die verfügbaren Feuchtemeßsysteme.	141
30	Einwaagen für die schichtdickenabhängigen Versuche.	144
31	Beispiel für die Meßdatenaufbereitung (Litronic FMS 1998).	145
32	Ergebnisse der Laborversuche mit Franz Ludwig H <sub>2</sub> O.	146
33	Ergebnisse der Laborversuche mit Strandberg Type 6711.	147
34	Ergebnisse der Laborversuche 1997 mit dem MESA MM55 System.	148
35	Ergebnisse der Laborversuche 1997 mit dem MESA MM55 System.	149
36	Ergebnisse der Laborversuche 1998 mit dem MESA MM55 System.	150
37	Ergebnisse des Rütter Quadra Beam 6500.	151
38	Ergebnisse der Laborversuche 1997 mit dem Litronic FMS System.	152
39	Ergebnisse der Laborversuche 1998 mit dem Litronic FMS System.	153

## Abkürzungen und Symbole

A	Plattenfläche
$A_S$	Meßfläche
$\alpha_M$	Meßwinkel
a. a. O.	am angeführten Ort
Abb.	Abbildung
B	Breite
C	Kapazität
CAN	Controller Area Network
$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
$d_S$	Sensorabstand
D	mittlere Abweichung
DMS	Dehnungsmeßstreifen
e	Eindringtiefe
E	elektrisches Feld
Elos	Quotient enzymlösbarer organischer Masse zu organischer Masse
€	Euro
$\epsilon_0$	elektrische Feldkonstante = $8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ pF m}^{-1}$
$\epsilon_r$	Dielektrizitätskonstante von Wasser [-]
F	Forderung
F	Farad
FM	Frischmasse
G	Wechselstromgenerator
gew.	gewichteter
GPS	Globales Positionierungssystem
H	Bauhöhe
$H_{\text{ges}}$	Gesamtbauhöhe
$H_S$	Sensorbauhöhe
$H_{\text{MT}}$	Flanschbauhöhe
Hz	Herz
ISO	International Organization for Standardization
K	Konstante
k. A.	keine Angabe
$k_P$	Formfaktor für die Plattenform
kg	Kilogramm
KWS	Kleinwanzlebener Saatzucht



L	Schichtdicke
$\lambda$	Wellenlänge
$m_{tr}$	Masse der trockenen Substanz
$m_w$	Wassermasse
$mA$	$10^{-3}$ Ampere
max.	maximal
ME	Metabolisierbare Energie
MHz	$10^6$ Hertz
min.	minimal
MJ	$10^6$ Joule
mm	$10^{-3}$ Meter
Mt	$10^6$ Tonnen
$\mu A$	$10^{-6}$ Ampere
$\mu m$	$10^{-6}$ Meter
n	Anzahl an Messungen
nm	$10^{-9}$ Meter
NEL	Netto Energie Laktation
NIR	Near Infrared Reflectance
NIT	Near Infrared Transmission
Nr.	Nummer
$pF$	$10^{-12}$ Farad
R	(dielektrischer) Verlustwiderstand
$R^2$	Bestimmtheitsmaß
Rfa	Rohfaser
Rp	Rohprotein
$\rho$	Dichte des Erntegutes
s	Sekunde
S	Standardabweichung
S.	Seite
SECV	Standard Error of Cross Validation
SFK	Streifeldkondensator
SPFH	self propelled forage harvester
St.	Stück
t	Tonne
T	Tiefe
T€	tausend Euro
TDR	time domain reflectometry (Zeitbereichsreflektometrie)
TM	Trockenmasse

---

TS	Trockensubstanzgehalt
$U_a$	Ausgangsspannung
$v_M$	Materialgeschwindigkeit
VDC	Volt Gleichstrom
W	Wunsch
$\varphi$	absolute Feuchte (aktuell)
$\varphi_0$	absolute Feuchte (vor Neukalibrierung)
$\varphi_{tr}$	relative Feuchte
$X_C$	komplexer Widerstand eines Kondensators

# 1 Einleitung

**Qualität ist die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Anforderungen zu erfüllen [12].**

## 1.1 Die Notwendigkeit der Qualitätskontrolle

Im Laufe der letzten Jahrzehnte erfolgten in der Landwirtschaft umfangreiche Veränderungen der Produktionsstrategien. Zahlreiche Betriebe spezialisierten ihre Produktion, die Betriebsgrößen nahmen zu und die Produktivität wurde stark erhöht. Diese Umstrukturierung bestehender Verhältnisse brachte gleichzeitig neue Anforderungen an Produktionsprozesse und deren Kontrolle mit sich. Starke Spezialisierung, wachsende Betriebsgrößen, überbetrieblicher Maschineneinsatz, Fremdarbeitskräfte und Lohnarbeiten sind als Hauptursachen für Informationsverlust und gleichzeitig **steigenden Informationsbedarf** zu sehen.

Zudem entwickelt sich die Nahrungsmittelproduktion weg von reiner Massenproduktion hin zur **Erzeugung qualitativ hochwertiger Produkte**. Um wettbewerbsfähig zu sein, müssen diese kostengünstig, das heißt, unter effektivem Einsatz von Produktionsmitteln erzeugt werden. Dies bedingt sowohl einen hohen Automatisierungsgrad als auch eine durchgängige Qualitäts- und somit Prozeßkontrolle. Beispielsweise sind Unternehmen, die eine Zertifizierung nach DIN EN ISO 9001 besitzen, verpflichtet, ihre internen Abläufe zu standardisieren, zu **kontrollieren** und zu **dokumentieren** [13]. Die sogenannte Betriebsdatenerfassung ermöglicht diese Überwachung der Fertigungsabläufe in einem Industriebetrieb. Geeignete Werkzeuge für eine umfassende Dokumentation in der Landwirtschaft beinhalten die Systeme des teilflächenspezifischen Bewirtschaftungskonzeptes, das bis heute allerdings nicht vollständig umgesetzt ist.

Erst eine solche lückenlose Dokumentation würde es ermöglichen, daß alle an der Nahrungsmittelproduktion beteiligten Unternehmen wüßten, „welcher Prozeß“ zu „welcher Zeit“ an „welchem Ort“ unter „welchen Rahmenbedingungen“ mit „welcher Produktivität und Qualität“ abgelaufen wäre. So würde eine Transparenz im gesamten Produktionsprozeß möglich, die eine verbesserte Organisation, Bewertung und Qualitätskontrolle zur Folge haben könnte.

## 1.2 Fehlende Informationen in der Futtererzeugung

Ein zunehmendes Qualitätsbewußtsein der Verbraucher und die bereits erwähnten Anforderungen an eine durchgehende Informationskette in der Lebensmittel- und Futterproduktion machen einen weiteren Fortschritt in der Qualitätskontrolle notwendig. Für die Prozeßkontrolle innerhalb von Fabrikanlagen sind die dafür benötigten Werkzeuge weit entwickelt. Von einfachen Bestimmungen geometrischer Abmessungen bis hin zu komplexen chemischen Reaktionen müssen alle Produktionsprozesse überwacht werden. Basierend auf unterschiedlichen Meßverfahren können physikalische Größen erfaßt und dargestellt werden. Für den mobilen Einsatz auf Fahrzeugen sind dagegen nur wenige Sensorsysteme verfügbar. So sind beispielsweise Informationen über Abstände oder Entfernungen, Gewichte und Materialeigenschaften auf Landmaschinen und Baumaschinen wichtig.

Der Parameter **Feuchte** ist allgemein als einer der **Schlüsselparameter** für die Prozeßtechnik in verschiedensten Produktionszweigen bekannt. Um ökonomisch und ökologisch optimal zu wirtschaften, ist eine exakte Kenntnis der Trockenmasse notwendig. Sowohl die abgebende als auch die aufnehmende Hand können durch Fehler in der Wassergehaltsbestimmung viel Geld verlieren. So geht zum Beispiel einem Landwirt, der seinen Weizen mit 13,5 % Feuchte verkaufen dürfte, ungefähr 1,3 % an Masse verloren, wenn er diesen mit 12,5 % verkaufen würde. Oder ein weiteres Beispiel: Ein Feuchteunterschied von einem Prozentpunkt ergibt bei einer Weltweizenproduktion von 584.697.385 Mt im Jahre 1999 eine Differenz von 6.682.255 Mt aus. Dies entspricht etwa einem Drittel der Gesamtproduktion an Weizen in Deutschland im Jahr [16].

Für eine **Optimierung der Qualität und des Gewinns** aus landwirtschaftlicher Produktion ist die Kenntnis und Dokumentation der Feuchte unabdingbar. Dieses Ziel ist jedoch nur mit Hilfe genauer kontinuierlich arbeitender Feuchtemeßsysteme realisierbar, die bis heute für den Einsatz auf Futtererntemaschinen nicht verfügbar sind. Deshalb werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Lösungsansätze für die Feuchtemessung während der Futterernte aufgezeigt.

## 2 Stand des Wissens

In den letzten Jahren erlebte die kontinuierliche Feuchtemeßtechnik an Feststoffen in der Prozeßsteuerung eine zunehmende Verbreitung. Feuchtesensoren erfassen beispielsweise in Zement- und Chemieanlagen den Wassergehalt der jeweiligen Charge. Dieser Istwert wird anschließend mit einem Sollwert verglichen, so daß entsprechend in den Regelkreis eingegriffen werden kann. Die Mehrzahl der heute auf dem Markt verfügbaren Systeme findet bei mineralischen Stoffen, wie Sand und Kies Anwendung.

Der Einsatz dieser Meßverfahren auf Futtererntemaschinen bedeutet folgende gravierende Unterschiede im Vergleich zu den heutigen Einsatzgebieten:

- Mobiler Einsatz auf Landmaschinen
- Messung an organischen Materialien
- Variation der Feuchte über einen vergleichsweise großen Bereich
- Sehr inhomogener Materialaufbau.

Der Versuch bekannte Meßtechnik in einem bis dahin unbekanntem Bereich einzusetzen, kann nur mit Kenntnis der physikalischen Grundlagen der Feuchte, der Feststoffe und der entsprechenden Meßtechnik erfolgen. Zudem werden Begriffe für die Beschreibung der Meßgrößen definiert und die bekannten Feuchtemeßverfahren beschrieben.

### 2.1 Physikalische Eigenschaften des Meßgutes

Grundsätzlich läßt sich das Meßgut – in diesem Fall Futtererntegüter, das heißt organisches Material – in Trockensubstanz und Wasser unterteilen, dessen Eigenschaften im folgenden näher dargestellt werden sollen.

#### 2.1.1 Eigenschaften des Wassers

Der Aufbau des Wassermoleküls als Dipol ist die Ursache für die chemischen und physikalischen Eigenschaften (Abbildung 1). Deshalb besitzt Wasser eine hohe Dielektrizitätskonstante  $\epsilon_r$  von 80, ein großes Lösungs- sowie spektrales Absorptionsvermögen und verursacht starke optische Brechung. Soll Wasser

im Verband mit anderen Stoffen meßtechnisch erfaßt werden, bedient sich die Meßtechnik der Eigenschaften des Wassers. Als markante Punkte der Temperaturskala gelten  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  als Gefrierpunkt und  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  als Siedepunkt des Wassers bei Normaldruck. Ein Hauptbestandteil vieler organischer Feststoffe ist Wasser, das somit deren physikalische und chemische Eigenschaften beeinflusst [24].

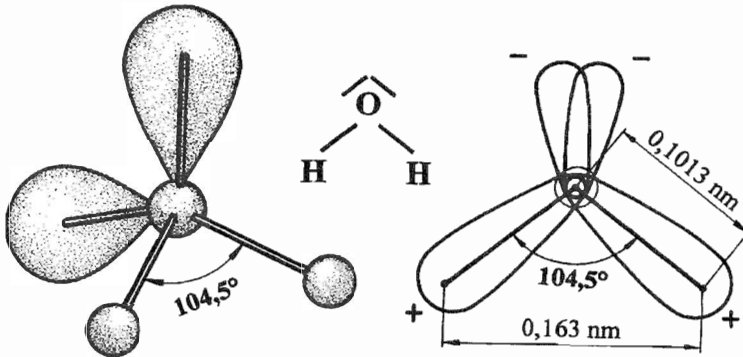


Abbildung 1: Aufbau des Dipolmoleküls Wasser [2, 7].

### 2.1.2 Wasserbindungen in Feststoffen

Allgemein ist Wasser in Feststoffen mit verschiedenen Formen unterschiedlicher Bindungsenergien an- oder eingelagert. Die geringste Bindung hat dabei das freie Wasser, welches durch die Schwerkraft vom Material abtropfen kann. Stärkere physikalische Bindungen basieren auf Adsorption, Adhäsion oder Kapillarkräften. Chemisch gebundenes oder in monomolekularen Schichten adsorbiertes Wasser ist am stärksten in den Stoff eingebunden und kann somit von den meisten Feuchte-meßverfahren nicht erfaßt werden. Diese unterschiedlichen Bindungsformen des Wassers an einen Feststoff machen eine scharfe Abgrenzung der einzelnen Wasserfraktionen unmöglich, da die Bindungsenergien und somit die Möglichkeiten zur Trennung sehr verschieden sind [24, 26].

Nach KUPFER 1990 [23] sind folgende Formen der Wasserbindung in Feststoffen vorhanden:

*a) Chemisch und chemisorptiv gebundenes Wasser*

Diese auch als Kristallwasser oder Konstitutionswasser bezeichneten Moleküle sind direkt in die Struktur des Stoffes eingebaut. Die chemische Bindung erfolgt meist durch Hydrolyse. Somit kann dieses Wasser nicht von Meßprinzipien erfaßt werden, die ausschließlich auf freies Wasser reagieren. Die Trennung des fest gebundenen Wassers ist nur mittels chemischer Reaktionen oder Glühens des Materials möglich. Dabei werden in der Regel auch die Molekülstrukturen des Feststoffes zerstört.

*b) Adsorptionswasser (Haftwasser)*

An der Phasengrenzfläche eines festen Stoffes durch elektrostatische oder „van-der-Waalsche“ Kräfte angelagertes Wasser wird Adsorptionswasser genannt. Abhängig von der spezifischen Oberfläche des Kornes oder Partikels und dem dadurch vorhandenen Kraftfeld kann eine bestimmte Menge Wasser gebunden werden. Diese Form der Bindung ist auch als physikalisch-chemische bekannt.

*c) Adhäsionswasser*

Infolge intermolekularer Wechselwirkungen hängen die Wassermoleküle adhesiv auf den Grenzflächen. Maßgebend für die Bindungskräfte ist auch hier die spezifische Oberfläche (Oberfläche / Gewicht). Je geringer die Korngröße, desto größer die spezifische Oberfläche und desto mehr Adhäsionswasser kann gebunden werden. Eine klare Abgrenzung zum Adsorptionswasser ist nicht vorhanden.

*d) Innenkapillarwasser (Zellwasser)*

Sind die Kapillarkräfte eines porösen Stoffes wesentlich größer als die gravimetrische Kraft des Wasser, erfolgt dessen Einlagerung in Kapillaren. Dabei werden die Eigenschaften des freien Wassers weitgehend beibehalten. Das Wasserbindungsvermögen hängt von der Geometrie und Struktur der Kapillaren ab. Daher werden kapillare Bindungen auch als physikalisch-mechanische Bindungen bezeichnet.

*e) Zwischenraumkapillarwasser*

Das Zwischenraumkapillarwasser ist in feuchten Materialien mengenmäßig vorherrschend. Es ist mit sehr geringer Bindungsenergie in engen Hohlräumen,

Poren und Zwickeln zwischen den Stoffteilchen enthalten. Je größer die Dichte und die Korngröße eines Materials sind, desto weniger Zwischenraumkapillarwasser ist enthalten.

#### f) Tropfwasser

Tropfwasser ist der Wasseranteil, der lose am oder im Stoff sitzt und alleine durch die Schwerkraft abtropfen kann. Für die Anlagerung von Tropfwasser (= Nässe) ist es ausreichend, daß der Stoff selber eine geringe Eigenfeuchte besitzt.

Durch Temperaturerhöhung, das heißt durch Energiezufuhr, lockern sich die Bindungen. Beispielsweise reduzieren sich die Kapillarkräfte um etwa 0,2 %/K.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Unterschiede:

- In mineralischen Stoffen wie Sand oder Kies ist freies Wasser in Hohlräumen und Kapillaren adhäsiv gebunden. Es ist durch Trocknen vollständig zu entfernen (Zwischenraumkapillarwasser).
- Im Gegensatz dazu halten Pflanzen das durch die Wurzeln aufgenommene Wasser durch Kapillarkräfte und Osmose. Dabei sind überwiegend Adsorptions-, Adhäsions- und Zellwasser zu finden.

### 2.1.3 Einflußfaktoren auf die Feuchtebestimmung

Neben den Eigenschaften des Wassers müssen auch jene der Trägermaterialien für die Entwicklung und den Einsatz einer Feuchtemeßtechnik berücksichtigt werden.

KUPFER 1997 [24] beschreibt folgende Haupteinflußfaktoren auf die Feuchtemessung in Feststoffen: **Schüttdichte** beziehungsweise **Korngröße** und **Salzgehalt**.

Wichtigste Voraussetzung für eine exakte Feuchtemessung ist eine konstante **Materialdichte**. Eine Schüttdichteänderung wirkt sich auf die Genauigkeit fast aller Meßprinzipien negativ aus. Je größer die Dichte, desto höher ist der gemessene Feuchtwert. Tatsächlich erfolgt aber nur ein besserer Kontakt zwischen Wasserfilm und Sensor sowie eine Verstärkung der Wasserbahnen. Weiter hat die **Korngröße** Einfluß auf die Schüttdichte. Eine kleinere Korngröße



ße bringt eine größere Dichte und gleichzeitig eine Homogenisierung des Materials mit sich.

Mit der Zunahme des **Salzgehaltes** in Wasser steigt die Leitfähigkeit. Sind Salze in Feststoffe eingelagert, verschieben sich die Sorptionsthermen. Zudem erfolgt durch Kristallisieren von Salzen eine Volumenvergrößerung. Die einschlägige Literatur nennt keine weiteren Inhaltstoffe, die Auswirkungen auf die Meßgenauigkeit haben können.

Alle diese Erscheinungen können je nach Meßprinzip die Ergebnisse verfälschen. Wie bereits bei den Bindungsarten von Wasser beschrieben, können Umgebungs- und Materialtemperatur einen wesentlichen Einfluß auf das Meßergebnis haben.

## 2.2 Begriffsdefinitionen für die Feuchtemessung

Grundsätzlich kann die Feuchtemessung in zwei Kategorien eingeteilt werden:

- ◆ **Feuchtemessung in Luft oder Gasen**
- ◆ **Feuchtemessung in festen und flüssigen Stoffen**

KORMANN 1997 [20] zeigt in einer grundlegenden Untersuchung über die Möglichkeiten der Feuchtebestimmung in Futtererntegütern auf, daß dazu ausschließlich die Verfahren zur Feuchtemessung in Feststoffen in Betracht kommen. Diese Einschränkung gilt für alle weiteren Ausführungen.

Für den Wassergehalt fester Stoffe sind zahlreiche Bezeichnungen für gleiche, aber auch unterschiedliche Feuchtekenwerte gebräuchlich. Demzufolge ist es notwendig, einheitliche und exakte Definitionen festzulegen, auf die weiter aufgebaut werden kann.

VDMA 24351 1999 [45] legt fest, daß zur **Materialfeuchtebestimmung** das in einem Feststoff durch Adsorption beziehungsweise Adhäsion angelagerte und in Kapillaren eingelagerte physikalisch gebundene Wasser sowie freies Wasser meßtechnisch erfaßt werden. Demnach wird das chemisch gebundene Wasser nicht erfaßt.

Zur Beschreibung des Wassergehaltes fester Stoffe sind in der Literatur folgende Definitionen zu finden:

- ◆ **Absolute Feuchte**  $\varphi$  (Feuchtegehalt / moisture content wet basis)

$$\varphi [\%] = 100 \cdot \frac{m_w}{m_w + m_{tr}} \quad (1)$$

( $m_{tr}$ : Masse der trockenen Substanz,  $m_w$ : Wassermasse)

Dieser Begriff wird in der Praxis am häufigsten verwendet. Im weiteren Verlauf der Arbeit steht der Begriff Feuchte immer für die absolute Feuchte.

- ◆ **Relative Feuchte**  $\varphi_r$  (Feuchteanteil / moisture content dry basis)

$$\varphi_r [\%] = 100 \cdot \frac{m_w}{m_{tr}} \quad (2)$$

( $m_{tr}$ : Masse der trockenen Substanz,  $m_w$ : Wassermasse)

Bei Stoffen unterschiedlicher Feuchtegehalte ist ein Wert bezogen auf die Trockensubstanz üblich.

- ◆ **Trockensubstanzgehalt TS** (Trockenmasseanteil / dry matter)

$$TS [\%] = 100 \cdot \frac{m_{tr}}{m_w + m_{tr}} = 100 - \varphi \quad (3)$$

( $m_{tr}$ : Masse der trockenen Substanz,  $m_w$ : Wassermasse)

Als Qualitätsparameter für Futtermittel in der Landwirtschaft wird meist der TS-Gehalt und nicht die Feuchte verwendet.

Diese Feuchtekenwerte lassen sich über die Dichte des Materials in volumenbezogene Feuchtekenwerte umrechnen, mit denen beispielsweise die Mauerwerksfeuchte oder die Bodenfeuchte angegeben werden.

Der Trockensubstanzgehalt (TS) trägt die Einheit „Prozent“, die **Trockenmasse** und die **Frischmasse** dagegen die Einheit „Gramm“.

Das **Meßverfahren** oder **Meßprinzip** beschreibt das physikalische Grundprinzip, das diesem Verfahren zugrunde liegt. Der Begriff **Meßsystem** oder **Sensorsystem** beinhaltet die elektronische Auswerteeinheit und den **Sensor** beziehungsweise **Meßkopf**.

### 2.3 Verfahren zur Feuchtemessung in Feststoffen

Feuchtemeßverfahren für Feststoffe können in zwei grundlegende Klassen getrennt werden (Tabelle 1):

Bei den Direkte Meßverfahren wird das Wasser vom Feststoff getrennt. Sie werden meist als Referenzmethoden angewandt.

Die **Indirekten Meßverfahren** machen sich die ausgeprägten Eigenschaften des Wassers sowie darauf basierende Änderungen des Probekörpers zu Nutzen. Diese sind:

1. Änderungen der komplexen Dielektrizitätskonstante
2. Einfluß der Ionenleitfähigkeit
3. Infrarotabsorptionsbanden von Wasser
4. Abbremsen der Neutronen durch Wasserstoffkerne
5. Spinresonanz von Wasserstoffkernen in starken Magnetfeldern
6. Materialdichte
7. Akustische Eigenschaften
8. Optische Eigenschaften (sichtbares Licht)
9. Sorption
10. Wärmeleitfähigkeit
11. Mechanische Eigenschaften

Indirekte Meßverfahren erfassen zum einen die der Feuchte proportionale Größe, werden aber zum anderen auch von den Eigenschaften des Meßgutes beeinflusst. So ist beispielsweise die Feuchtemessung mit Mikrowellen sehr stark von der Materialdichte abhängig. Um diesen Störeinfluß zu kompensieren, kommt häufig eine radiometrische Dichtemessung zum Einsatz. Durch Verknüpfung der beiden Meßsignale ist eine Dichtekompensation möglich. Durch Kombination geeigneter Meßverfahren können Einflußfaktoren auf die Feuchtemessung eliminiert werden.

Tabelle 1: Die Wassergehaltsmeßverfahren für feste Stoffe nach KUPFER und LÜCK [24, 25].

Verfahrensgruppe	Nr.	Bezeichnung des Verfahrens	Eigenschaft / Änderung	technische Relevanz
<b>Direkte Meßverfahren:</b>				
Absolutverfahren	1	Dörr – Wäge – Methode		ja
	2	Destillationsmethode		nein
	3	Trennung der Absorption		nein
Chemische Verfahren	4	Calciumcarbid – Methode		nein
	5	Karl – Fischer – Titration		ja
	6	Weitere Hydrolysemethoden		nein
<b>Indirekte Meßverfahren:</b>				
Elektrische Verfahren	7	Elektrische Leitfähigkeits – Messung	2	ja
	8	Dielektrische Messung	1	ja
	9	Kapazitive Messung	1	ja
	10	Mikrowellen – Absorptionsmenge	6	ja
Spektrometrische Verfahren	11	Infrarot – Methode	3	ja
	12	Kernresonanz – Methode	5	nein
	13	Optische Brechungsmessung	8	nein
Radiometrische Ver- fahren	14	Kernstrahlungsverfahren	4	ja
	15	Röntgenstrahlverfahren	4	nein
Akustische Verfahren	16	Ultraschallverfahren	7	nein
Thermometrische Verfahren	17	Wärmeleitfähigkeits – Messung	10	nein
	18	Hydrationswärme – Messung	10	nein
	19	Trocknungstemperatur – Messung	10	ja
	20	Gefrier – und Siedepunkts – Messung	6	nein
Hygrometrische Verfahren	21	Gleichgewichts – Luftfeuchtigkeits – Messung	9	ja
	22	Trocknerabluft – Messung	9	nein
Mechanische Verfahren	23	Schüttdichte – Messung	11	nein
	24	Schüttwinkel – Messung	11	nein
	25	Verformungsleistungs – Messung	11	nein
	26	Siebbarkeits – Messung	11	nein

Von der Vielzahl der Feuchtemeßverfahren sollen die technisch relevanten erläutert werden, die prinzipiell für eine kontinuierliche Erfassung der Feuchte oder als Referenzmethoden in Betracht kommen. KUPFER 1997 [24] und LÜCK 1964 [26] beschreiben die Verfahren wie folgt:

### 2.3.1 Trockenschrankverfahren

Dieses wird auch als Dörr- Wäge- Verfahren bezeichnet und ist die am meisten eingesetzte Methode der Feuchtekontrolle. Es dient als Vergleichsverfahren zur Beurteilung der indirekten Feuchtemeßverfahren und ist als Normverfahren anerkannt. Als absätziges Verfahren zur Feuchtemessung eignet sich die Trockenschrankmethode nicht für die kontinuierliche Feuchtebestimmung im Materialstrom.

Bei diesem Verfahren wird eine geeignete Anzahl von Referenzproben eines Materials bei einer konstanten Temperatur bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Dies bedeutet, daß das physikalisch gebundene Wasser „vollständig“ aus dem Material entfernt worden ist. Beim Erreichen der Gewichtskonstanz ist das Material nicht ganz getrocknet, sondern es hat sich ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Dampfdruck im Material und im Trockenschrank gebildet. Sind genügend Stichproben genommen worden, kann der Feuchtwert sehr genau bestimmt werden. Die zum Trocknen notwendige Temperatur und Zeitdauer sind für viele Produkte in Normen festgelegt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu sichern. Werden zu hohe Temperaturen gewählt, erfolgt eine Materialumwandlung. Bei organischen Materialien kann eine thermische Veränderung entstehen, bei der neben Wasser auch flüchtige Bestandteile wie Öl ausgetrieben werden oder eine Oxydation stattfindet.

Die Bestimmung der Feuchtigkeit bei Futtermitteln erfolgt nach ASAE S358.2 [3] bei einer Temperatur von  $103 \pm 2$  °C über 24 Stunden fest, wobei eine repräsentative Probe aus 25 g Probenmaterial besteht. VDLUFA 1997 [43] legt als Methode 3.1 die Trocknung von 5 g Probenmaterial bei  $103 \pm 2$  °C über vier Stunden fest.

### 2.3.2 Leitfähigkeitsmessung

Dabei handelt es sich um ein gängiges, kostengünstiges Verfahren zur Feuchtebestimmung, das darauf beruht, daß feste, nichtleitende Materialien aufgrund ihrer Ionen oder Elektronen einen meßbaren elektrischen Leitwert besitzen. Eine Vielzahl dieser Geräte ist auf dem Markt verfügbar, wobei nur ein sehr eingeschränkter Feuchtebereich (4 – 20 %) erfaßt werden kann. Parameter wie Temperatur, Salzgehalt und Materialandruck haben einen starken Einfluß auf die Meßgenauigkeit.

Abbildung 2 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild für die Leitfähigkeitsmessung (= konduktive Messung).

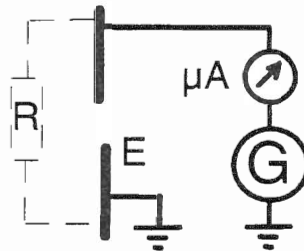


Abbildung 2: Ersatzschaltbild der Leitfähigkeitsmessung nach FREY 1997 [17].

In diesem Fall wird der dielektrische Verlustwiderstand  $R$  durch das Meßgut gebildet, das sich im elektrischen Feld  $E$  befindet. Die Systeme werden überwiegend mit symmetrischem Wechselstrom (kHz) betrieben, der durch einen Generator  $G$  bereitgestellt wird. Dadurch können Polarisierungseffekte vermieden werden. Das Meßsignal [ $\mu\text{A}$ ] steht in einem logarithmischen Zusammenhang zur Materialfeuchte.

### 2.3.3 Dielektrische Messung

Eine erweiterte Leitfähigkeitsmessung stellt die dielektrische Messung dar, die oft fälschlicherweise auch als kapazitive Messung bezeichnet ist. Mit diesem Meßaufbau kann ein etwas weiterer Feuchtebereich detektiert werden, ohne daß die Schaltung wesentlich komplizierter wird. Das Meßgut wird als Dielektrikum auf die Platten eines Streufeldkondensators SFK gebracht (Abbildung 3).

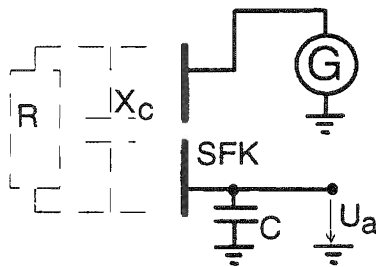


Abbildung 3: Ersatzschaltbild der dielektrischen Messung nach FREY 1997 [17].

In Abhängigkeit von der Feuchte verändert der Kondensator seinen komplexen Widerstand  $X_C$  und der dielektrische Verlustwiderstand  $R$  ändert sich. Bei diesem Meßverfahren werden die unterschiedlichen Dielektrizitätskonstanten  $\epsilon_r$  von Wasser und Trockensubstanz ausgenutzt. Wasser hat aufgrund des Dipolcharakters der Moleküle ein  $\epsilon_r$  von 80, die Trockensubstanz von 6. Die Kapazität  $C$  des Kondensators berechnet sich durch

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot k_p \cdot \frac{A}{d} \quad (4)$$

( $C$ : Kapazität des Kondensators [ $F$ ],  $\epsilon_0$ : elektrische Feldkonstante = 8,85 pF/m,  $\epsilon_r$ : Dielektrizitätskonstante [-],  $k_p$ : Formfaktor für Plattenform [-],  $A$ : Plattenfläche [ $m^2$ ],  $d$ : Plattenabstand [ $m$ ])

Der Streufeldkondensator bildet mit der festen Kapazität  $C$  einen Spannungsteiler, der mit einer hochfrequenten Wechselspannung ( $f \gg 1$  MHz) versorgt wird. Danach kann die feuchteabhängige Wechselspannung  $U_a$  abgegriffen werden, die von den beiden Größen  $X_C$  und  $R$  beeinflusst wird. In einem sehr engen Meßbereich kann der Zusammenhang Feuchte und Ausgangsspannung als linear gelten. Die Meßergebnisse unterliegen auch bei diesem Meßverfahren stark den Umgebungsbedingungen.

### 2.3.4 Kapazitives Meßverfahren

Im Gegensatz zur konduktiven oder dielektrischen Messung kommen hier die Blindkomponenten oder die Kapazität verstärkt zur Wirkung, wobei die Meßschaltungen mit höheren Frequenzen ( $> 10$  MHz) betrieben werden. Wie bei der dielektrischen Messung wird das Meßgut auf Platten eines Streufeldkondensators aufgebracht (Abbildung 4).

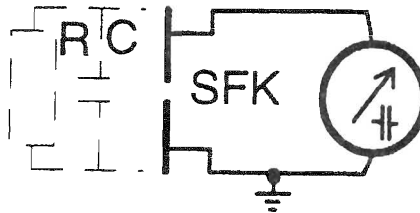


Abbildung 4: Ersatzschaltbild der kapazitiven Messung nach FREY 1997 [17].

Der Kondensator C verändert seine Kapazität in Abhängigkeit von der Feuchte. Ebenso verhält sich der Verlustwiderstand R. Wird das Dielektrikum komplex – nach Betrag/Phase oder  $R/C$  – ausgewertet, lassen sich Störeinflüsse wie Elektrolytgehalt verringern oder ausschalten. Über eine Amplitudenregelung ist es im Gegensatz zum dielektrischen Verfahren möglich, einen Feuchtebereich von annähernd 0 – 100 % zu messen. Somit ist ein Kapazitätswert vorhanden, der über einen weiten Bereich in einem linearen Zusammenhang mit der Materialfeuchte steht. Für dieses Verfahren ist der Materialeinfluß und der Dichteinfluß vergleichsweise hoch. Für heterogene Materialien ist eine Dichtekompensation notwendig.

Abbildung 5 zeigt Möglichkeiten der Plattenausbildung bei elektronischen Meßverfahren. Somit kann die Meßtechnik optimal an den Materialstrom angepaßt werden.



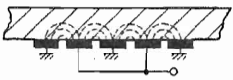
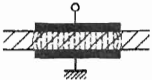

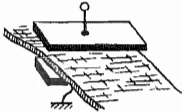

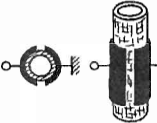

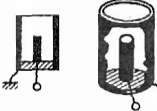
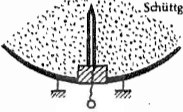
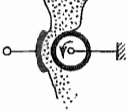

<p>Streufeldkondensatoren</p> 	<p>Parallelfeld-Kondensatoren</p> 
<p>Kammelektrode</p> 	<p>Platten-Kondensator</p> 
<p>Konzentrische Elektrode</p> 	<p>Durchfluß-Elektrode</p> 
<p>Streichleistenelektrode</p> 	<p>Becher-Elektrode</p>  <p>(z. Anschauung Gefäßwand durchbrochen)</p>
<p>Messerelektrode (Nadelelektrode)</p>  <p>„Schüttgutstrom“</p>	<p>Walzen-Elektrode</p> 
<p>Rollenelektrode</p> 	

Abbildung 5: Plattenformen bei elektronischen Meßverfahren nach LÜCK 1964 [26] <sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> a.a.O. S.220, Tafel 9.6202

### 2.3.5 Mikrowellenmeßverfahren

Wassermoleküle werden durch elektromagnetische Wellen zum Schwingen angeregt, wobei gleichzeitig dem strahlenden Feld Energie entzogen wird (Dämpfung). Absorption und Reflexion sind dann ein Maß für die Feuchte. Proportional zur Schichtdicke erfolgt abhängig vom Dielektrikum gleichzeitig eine Phasenverschiebung.

Bei der Feuchtemessung mittels Mikrowellen werden je nach Anwendungsgebiet Meßfrequenzen von 0,3 bis 20 GHz eingesetzt. Bei Strahlerleistungen unter 5 mW sind keine weiteren Schutzmaßnahmen notwendig.

In der Praxis werden Transmissions-, Reflexions- und Resonatorverfahren so wie Zeitbereichsreflektometrie (time domain reflectometry = TDR) angewandt (Abbildung 6).

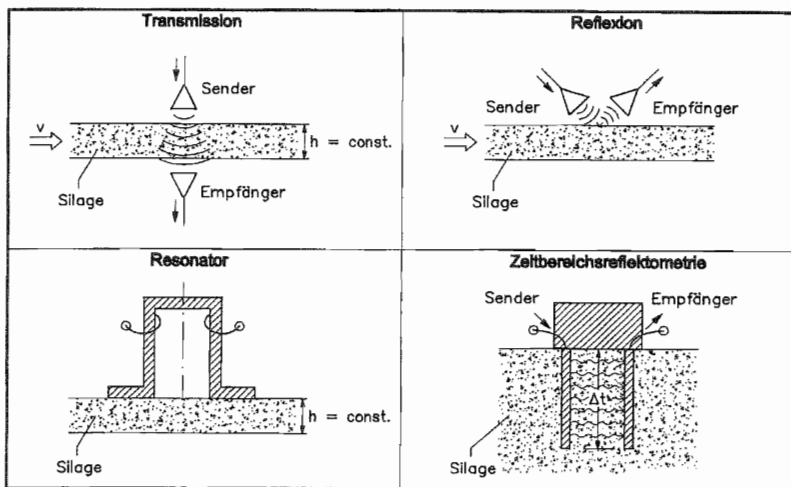


Abbildung 6: Mögliche Anordnungen für die Feuchtemessung mit Mikrowellen.

Sollen dünne Schichten mit hohen Feuchten analysiert werden, kommt das Reflexionsverfahren zum Einsatz. Dabei sind ein konstanter Abstand zwischen Antenne und Material sowie eine homogene Oberfläche Voraussetzung.

Das Mikrowellentransmissionsverfahren ermöglicht es, das gesamte Volumen zu durchstrahlen. Das System besteht aus Sende- und Empfangsantenne, zwischen welchen sich das Material befinden muß. Beide Meßverfahren erlauben eine kontinuierliche Messung und haben sehr kurze Meß- und Einschwingzeiten.

Beim Resonatorverfahren ist das Meßgut beispielsweise in einen Hohlraumresonator gefüllt. Die Resonanzfrequenz ändert sich in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt. Somit ist keine kontinuierliche Messung möglich. Wird jedoch die durch die Verstimmung auftretende Dämpfung des Signals an Stelle der Resonanzfrequenz gemessen, kann in einem Bypass kontinuierlich gemessen werden.

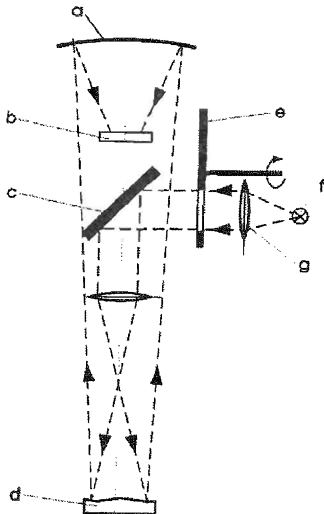
Bei der Zeitbereichsreflektometrie erfolgt die Messung der Zeit, die ein elektromagnetisches Signal für das Durchlaufen eines Wellenleiters bekannter Länge braucht. Je feuchter das Material, desto mehr Zeit wird benötigt.

Durch das Mikrowellenverfahren wird nur das physikalisch gebundene und das freie Wasser erfaßt.

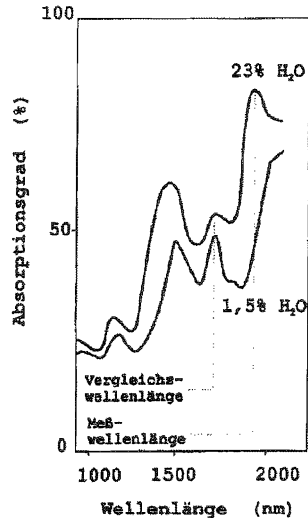
### **2.3.6 Infrarotmeßverfahren**

Neben den elektronischen können auch optische Meßverfahren für eine kontinuierlich arbeitende Feuchtemessung verwendet werden. Technisch von Bedeutung ist dabei die optoelektronische Feuchtemessung mittels Infrarotabsorption, die ähnlich wie bei der Mikrowellenmeßtechnik als Reflexions- (NIR) oder Transmissionssystem (NIT) zum Einsatz kommt.

Wasser besitzt im Infrarotspektralbereich (0,8  $\mu\text{m}$  bis 1 mm) einige ausgeprägte Absorptionsbanden. Zur Feuchtebestimmung wird die Veränderung eines Meßlichtstrahls (1,94  $\mu\text{m}$ ) im Meßgut aufgrund von Absorption, Reflexion und Transmission analysiert. Neben dem Meßlichtstrahl wird mindestens ein Vergleichslichtstrahl (beispielsweise 2,0  $\mu\text{m}$ ) eingesetzt, um andere Einflüsse, wie Körnung oder Farbe, auf die Messung unterdrücken zu können. Den prinzipiellen Aufbau eines solchen Meßsystems zeigt Abbildung 7. Die benötigten Wellenlängen können zum einen durch Ausfilterung aus einer Lichtquelle zum anderen gezielt mittels Diodenarrays erzeugt werden.



- a) Parabolspiegel
- b) PbS- Photowiderstand
- c) Planspiegel
- d) Meßgut



- e) rotierendes Filterrad
- f) Lampe
- g) Linse

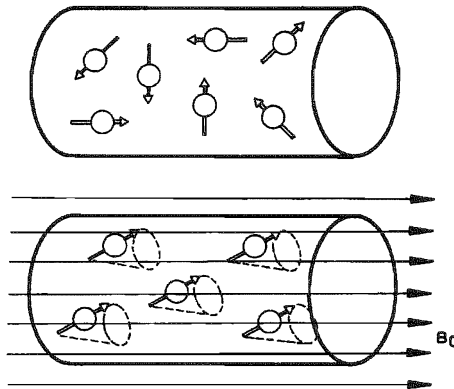
Abbildung 7: Grundaufbau eines NIR- Feuchte-meßgerätes und Absorptionsspektrum eines Meßgutes nach KUPFER 1997 [24]<sup>2)</sup>.

Für die Feuchtebestimmung in Feststoffen eignet sich ausschließlich das Reflektionsverfahren, da eine Durchstrahlung nicht möglich ist. Die sehr geringe Eindringtiefe der energiearmen Strahlung läßt somit nur eine Ermittlung der Oberflächenfeuchte zu. Die Vorteile dieser Technik liegen in der berührungslosen, verschleißfreien Messung, wobei sehr viel Fachwissen für Wartungs- und Kalibrierarbeiten notwendig ist.

<sup>2)</sup> a.a.O. S. 205, Abb. 11.1 und 11.3

### 2.3.7 Kernresonanzverfahren

Dieses Meßverfahren nutzt die Tatsache, daß alle Atomkerne mit ungerader Protonen- oder Neutronenzahl einen Eigendrehimpuls (Spin) und bedingt durch ihre räumlich ungleichen Ladungen ein magnetisches Moment besitzen. Wird nun das Dipolmolekül Wasser in ein Magnetfeld gebracht, richten sich die Dipolmomente in eine bestimmte Richtung aus (Abbildung 8). Nach dem Abschalten des Magnetfeldes wird durch das Zurückschwingen der Dipole in den Ausgangszustand eine Spannung induziert, die proportional der Anzahl der Wasserstoffkerne im Meßvolumen ist. Um eine maximale Spannung zu induzieren, wird die Kernmagnetisierung durch Einstrahlung eines Hochfrequenzimpulses durchgeführt. Die Frequenz des Impulses stimmt mit der Resonanzfrequenz der Dipole überein.



*Oben: Ohne äußeres Magnetfeld zeigen die magnetischen Dipole in alle Raumrichtungen.*

*Unten: Bei Anlegen eines äußeren Magnetfeldes  $B_0$  richten sich die Dipole aus, sie präzessieren auf einem Kegelmantel um die  $B_0$ -Feldlinien.*

Abbildung 8: Orientierung der Dipolmomente nach KUPFER 1997 [24]<sup>3)</sup>.

Das Kernresonanzverfahren – ähnlich der Kernspintomographie – besitzt im Gegensatz zum Neutronenstrahlungsverfahren keine biologischen Auswirkungen und ist somit zur Untersuchung von Lebensmitteln geeignet.

<sup>3)</sup> a.a.O. S.175, Abb. 9.1

### 2.3.8 Kernstrahlungsverfahren

Die Strahlungsmeßtechnik stellt eine schnelle und sichere Methode zur Ermittlung freien Wassers dar. Zur Feuchtebestimmung können  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -, Röntgen- oder Neutronen- Strahlung auf das Meßgut gesandt werden. Je nach Feuchtegehalt werden die Strahlungen verschieden stark absorbiert oder gestreut. Die mit Hilfe eines Zählrohres oder Szintillationsdetektors detektierte Reststrahlung ist ein Maß für den Wassergehalt im Meßgut. Die Durchdringungs- oder Eindringtiefe hängt in erster Linie von der Art der Strahlung (= Größe der Teilchen) ab. Die Messung kann entweder im Reflexions- oder im Durchstrahlungsmodus erfolgen.

Die auf dem Markt verfügbaren Meßsysteme nutzen meist  $\gamma$ - Strahlung, die eine hohe Eindringtiefe beziehungsweise Reichweite hat, und somit zur Durchstrahlung größerer Materialschichten geeignet ist. Weiter ist die Neutronenfeuchtemessung von technischer Bedeutung. Bei der Durchstrahlung müssen Flächengewicht und Schichtdicke konstant gehalten werden, um die Feuchte messen zu können (Abbildung 9).

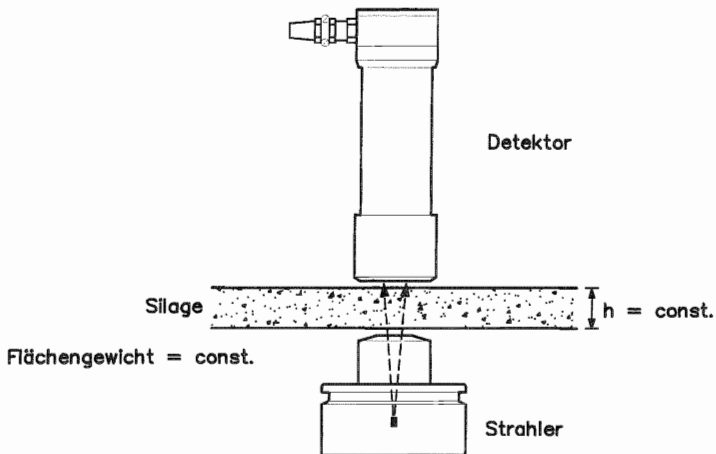


Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau eines  $\gamma$ -Strahlen Feuchtemeßsystems.

Da diese Meßsysteme radioaktive Präparate enthalten, ist im Vergleich zu anderen Meßprinzipien ein großer Sicherheitsaufwand zu betreiben. So sind die Meßeinrichtungen genehmigungspflichtig, das Personal muß geschult werden und entsprechende Schutzmaßnahmen (Absperrungen, Warnschilder, Versicherungen) sind notwendig.

### **2.3.9 Zusammenstellung der relevanten Feuchtemeßverfahren**

Basierend auf Literaturangaben läßt sich eine Übersicht für die technisch relevanten Feuchtemeßverfahren aufstellen (Tabelle 2). Die Genauigkeit der indirekten Meßverfahren hängt von der Beschaffenheit des Meßgutes und den Rahmenbedingungen für die Messung ab. So haben beispielsweise die Materialdicke und Schichtdicke über dem Meßkopf auf fast alle Meßverfahren einen großen Einfluß. Dagegen wirkt sich Fremdlichteinstrahlung nur auf Infrarotmeßsysteme aus.

Tabelle 2: Einflußfaktoren auf die technisch relevanten Feuchtemeßverfahren.

Meßverfahren		Leitfähigkeitsmessung	Dielektrische Messung	Kapazitives Meßverfahren	Mikrowellenmeßverfahren				Infrarotmeßverfahren		Kernresonanzverfahren	Kernstrahlungsverfahren ( $\gamma$ -Strahlung)
					Transmission	Reflexion	Resonator	TDR	Transmission	Reflexion		
1	Einfluß der Materialtemperatur	2	2	2	2	2	2	2	1	1	4	4
2	Einfluß der Materialdichte	2	1	1	2	2	2	2	1	4	3	2
3	Einfluß der Schichtdicke	2	2	2	2	4	2	2	1	4	3	2
4	Einfluß der Korngröße	2	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2
5	Einfluß des Sensorandrucks	2	2	2	4	4	4	4	3	3	2	4
6	Einfluß der Materialhomogenität	1	1	2	3	1	3	3	3	3	3	2
7	Einfluß des Fremdelektrolytgehaltes	1	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4
8	Einfluß der Materialfarbe	4	4	4	4	4	4	4	2	2	4	4
9	Einfluß von Fremdlicht	4	4	4	4	4	4	4	1	1	4	4
10	Einfluß des Meßgutes	3	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
11	Einfluß elektromagnetischer Strahlung	2	2	2	1	1	2	2	3	3	2	3
12	Einfluß der Materialgeschwindigkeit	3	3	3	2	2	0	0	3	3	2	3

Bewertung der Kriterien nach VDI Richtlinie 2225 [44]: 0 = unbefriedigend (ungünstig), 1 = noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = optimal (ideal)

Für die Auswahl eines geeigneten Feuchtemeßverfahrens ist es somit wichtig, die Eigenschaften des Meßgutes sowie die Materialflußbedingungen genau zu kennen.



### 2.4 Bekannte Feuchtemeßverfahren für Futtermüter

Werden die bekannten Systeme zur kontinuierlichen Feuchtebestimmung in Erntegütern aufgelistet, so ist deutlich zu erkennen, daß die unterschiedlichen Meßverfahren vorwiegend auf ihre Eignung zur Feuchtebestimmung in Körnerfrüchten untersucht wurden. Zum Einbau in Erntemaschinen sind derzeit überwiegend auf Leitfähigkeit basierende Feuchtemeßsysteme auf dem Markt verfügbar. Der Einsatz anderer Technologien ist nur aus Forschungsberichten bekannt. Tabelle 3 beinhaltet eine Liste von Veröffentlichungen über Ansätze zur Feuchtemessung in Erntegütern.

Tabelle 3: Bekannte Feuchtemeßsysteme für Erntegüter.

Meßprinzip	Erntegut	Feuchtebereich	Genauigkeit	Quelle
Kapazität	Silage	35 – 85 %	± 3 % (± 7 %)	[6] *
	Silage	40 – 85 %	± 9 %	[29] *
	Getreide	9 – 28 %	± 2 %	[27] *
Leitfähigkeit	Reis	22 – 27 %	± 1 %	[11]
	Getreide	10 – 20 %	± 1 %	[34]
Mikrowellenreflexion	Getreide	10 – 20 %	± 1 %	[33], [18]
Nahinfrarot- Reflexion (NIR)	Getreide	13 – 27 %	± 1 %	[27]
	Silage	55 – 65 %	± 3 %	[27], [37]

(\* kontinuierliche Messung auf einer Erntemaschine)

AHLGRIMM 1977 [1] versucht in einem Überblick unterschiedliche Feuchtemeßverfahren für deren Einsatz in der Landwirtschaft zu bewerten. Der Autor kommt zu dem Schluß, daß mehrere Systeme theoretisch einsetzbar wären. Als Hauptprobleme werden der weite Feuchtebereich und die Inhomogenität von Erntegütern herausgestellt. Die Entwicklung der Sensortechnik im Laufe von zwanzig Jahren hat allerdings gezeigt, daß die Aussagen dieser Veröffentlichung teilweise überholt sind.

Als einer der ersten stellt GASTEIGER 1992 [18] die Möglichkeiten einer kontinuierlichen Feuchtemessung mittels Nahinfrarotreflexion über einem Förderband dar. Dieses System kann für Gras, Pellets, Getreide, Backwaren, Trester und Silage eingesetzt werden.

RODE und PAUL 1999 [37] beschreiben den Einsatz eines NIRS- Dioden Array Gerätes zur Feuchte- und Inhaltsstoffbestimmung auf Haldrup Parzellenerntemaschinen. Dabei kommt das Zeiss MMS-NIR 1.7 System zum Einsatz. Ergebnisse über erreichbare Genauigkeiten sind zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Arbeit noch nicht veröffentlicht. Bei dem bisherigen Einsatz handelt es sich allerdings um ein absätziges Verfahren, bei dem die Probe gestoppt, vorverdichtet und anschließend gemessen wird.

Den Einsatz hochfrequenter elektromagnetischer Felder beschrieben SNELL et al. 2000 [39] als eine Möglichkeit zur Feuchtebestimmung in Silage. Die eingesetzte Anlage war jedoch für den mobilen Einsatz auf Erntemaschinen zu groß und benötigte zu viel Energie.

Ein akustisches Feuchtemeßsystem wurde von MEXAS et al. 1987 [31] für die Feuchtemessung in Getreide getestet. Aufgrund der Inhomogenität des Erntegutes kann dieses nicht für Silage eingesetzt werden. Einen Überblick über verfügbare Sensorik für Precision Farming in der Futterernte gibt MARCOTTE et al. 1999 [28].

Auf dem Markt sind derzeit drei kontinuierlich arbeitende Feuchtemeßsysteme für Futtererntemaschinen verfügbar (Tabelle 4). Diese erfassen einen sehr eingeschränkten Feuchtebereich oder es sind keine Praxisergebnisse bekannt.

*Tabelle 4: Liste der verfügbaren Feuchtemeßsysteme für Futtererntemaschinen.*

Anbieter	Bezeichnung	Erntemaschine	Meßprinzip	Meßbereich <sup>4)</sup>
CLAAS	REFLEX	Großpackenpresse	Leitfähigkeit	15 – 40 %
Delmhorst	FX 2000	Ballenpresse	Leitfähigkeit	8 – 40 %
TSI		Feldhäcksler	Kapazitiv	1 – 99 %

<sup>4)</sup> Meßbereich laut Herstellerangabe

Verschiedene Unternehmen besitzen Patente über die Feuchte- und Inhaltsstoffbestimmung in Futtererntegütern. Tabelle 5 enthält dafür eine Auswahl, die sich unmittelbar auf die kontinuierliche Feuchtemessung auf Futtererntemaschinen beziehen. Auffällig ist in diesem Zusammenhang, daß die in den Patenten beschriebenen Systeme bis heute auf dem Markt nicht wiederzufinden sind.

*Tabelle 5: Patentschriften über Feuchtemessung in Futtererntemaschinen.*

Patent Nr.	Inhaber	Inhalt	Quelle
DE19543343	CLAAS	Feuchtemessung in Ballenpressen	[10]
DE19648126	CLAAS	Mikrowellenfeuchtemessung Feldhäcksler	[15]
DE3232746	CLAAS	Feuchtemessung an einer Pickup	[38]
EP0931446	CLAAS	Feuchtemessung in Erntemaschinen	[14]
US4812741	Stowell,D.	Feuchtemeßsystem für Ballenpressen	[41]
US4815373	Ford N.H.	Anzeige eines Feuchtelimits bei Ballen	[42]
US4868491	Black,G.	Kontinuierliche Feuchtemessung bei Heuballen	[8]
US4929904	Ford N.H.	Feuchtesensor für Pickup einer Ballenpresse	[9]
US5991025	Pioneer	NIR Inhaltsstoffbestimmung in Erntemaschinen	[48]
US6100256	Dsquared	NIR Inhaltsstoffbestimmung in Erntemaschinen	[30]

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß derzeit auf dem Markt wenige kontinuierlich arbeitende Feuchtemeßsysteme für Futtererntemaschinen erhältlich sind, die zudem das breite Anforderungsspektrum resultierend aus dem Anwendungsbereich nicht erfüllen. Langzeiterfahrungen und neutrale Untersuchungen über die Praxistauglichkeit der Systeme liegen nicht vor.



### 3 Zielsetzung

Der Stand der Technik läßt deutlich erkennen, daß derzeit kein serienreifes, kontinuierlich arbeitendes Feuchtemeßsystem für den Einsatz auf Futtererntemaschinen auf dem Markt erhältlich ist. Die bekannten Lösungsansätze zeigen Probleme bei der Erfassung des gesamten Meßbereiches sowie beim Erzielen zufriedenstellender Genauigkeiten. Die in der Praxis notwendigen Mindestgenauigkeiten an die Feuchtemessung in Futtererntegütern sind derzeit nicht exakt definiert.

**Ziel dieser Arbeit wird deshalb die Anpassung verfügbarer Feuchtemeßsysteme an den mobilen Einsatz auf Futtererntemaschinen sein.** Nach Möglichkeit soll das gleiche System auf allen Futtererntemaschinen einsetzbar werden. Dadurch könnten der Kalibrieraufwand reduziert und größere Stückzahlen der Feuchtemeßsysteme erreicht werden.

Für die generelle Zielstellung sollen vorausgehende Laboruntersuchungen die **grundsätzliche Eignung** der unterschiedlichen physikalischen **Meßprinzipien** für die Feuchtemessung in Futtererntegütern (organischen Materialien) zeigen, da bislang nur wenige Erfahrungen auf diesem Gebiet vorliegen. Tests unter definierten Laborbedingungen sollen zudem die Erstellung von Kalibrierkurven ermöglichen. Des weiteren wird die Festlegung der jeweils notwendigen Genauigkeit unter Berücksichtigung von Feuchtebereich, Material und Erntekette erfolgen.

Im Labor erfolgreich getestete Feuchtemeßsysteme sollen anschließend in die **Erntemaschinen integriert** werden. Nach einer Analyse des Materialstroms und der Anbaumöglichkeiten soll eine Optimierung des mechanischen Anbaus der Meßköpfe an die Maschinen erfolgen. Dazu sollen an den vorhandenen Erntemaschinen möglichst wenige Änderungen vorgenommen werden. Die Sensorik ist so robust zu wählen, daß sie den Einsatzbedingungen der Praxis stand hält. Nach positiven Ergebnissen aus Feldtests soll eine Einbindung in die Bordelektronik der Maschine vorgenommen werden.

Zusätzlich zu dieser Entwicklungsarbeit sollen wirtschaftliche und politische Gesichtspunkte mit berücksichtigt werden, die aber für die grundlegenden Tests von untergeordneter Bedeutung sein werden.

Abschließend soll die Technologie der kontinuierlichen Feuchtemessung in die Verfahrenskette der Futtererzeugung eingeordnet werden. Eventuell daraus resultierende Änderungen werden aufgezeigt. Die mit Hilfe der Feuchtesensoren gewonnenen Daten erschließen neue Möglichkeiten für die Optimierung der Prozeßkette und der Logistik in der Landwirtschaft. Nutzungsmöglichkeiten für die gewonnenen Informationen sollen am Ende der Arbeit aufgezeigt werden.

## 4 Material und Methoden

Um das Projektziel zu erreichen, wurde ein siebenstufiger Projektplan erstellt, der den Leitfaden für die Arbeit sowie eine Kontrollfunktion für den Arbeitsfortschritt darstellt (Abbildung 10).

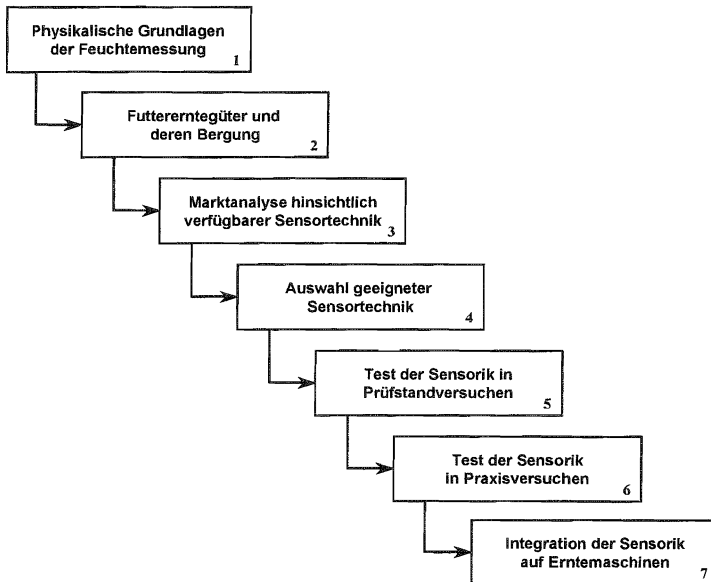


Abbildung 10: Projektplan „Feuchtemessung in Futtererntegütern“.

Die Ergebnisse von Projektabschnitt 1 „Physikalische Grundlagen der Feuchtemessung“ sind in Kapitel 2 dargestellt. Aus der Zusammenstellung möglicher Erntegüter mit ihren Eigenschaften und der Materialflußbedingungen in den Erntemaschinen lassen sich die Anforderungen an kontinuierlich arbeitende Feuchtemeßsysteme ableiten (Projektabschnitt 2). Die Marktanalyse gibt einen Überblick über die auf dem Markt verfügbaren Feuchtemeßsysteme (Projektabschnitt 3). Im Vergleich mit der Anforderungsliste wird geeignete Sensortechnik für das Projekt herausgefiltert (Projektabschnitt 4). Im Projektabschnitt 5 sind die grundsätzliche Eignung der Sensorsysteme für die Feuchtemessung in Erntegütern zu überprüfen und Grundkalibrierungen zu erarbeiten. Danach erfolgen Systemtests auf den Erntemaschinen und die Systemintegration.

#### 4.1 Feuchtigkeit als Qualitätsmerkmal von Ernteprodukten

Neben Körnerfrüchten, für die wie in Kapitel 2.4 aufgelistet funktionsfähige Feuchtemeßsysteme am Markt verfügbar sind, werden in der Landwirtschaft sehr vielfältige Erntegüter produziert. Sie weisen bei ihrer Bergung sehr unterschiedliche Feuchtegehalte auf.

Die einschlägige Literatur gibt beispielsweise den optimalen Erntezeitpunkt für Silomais bei einem Trockensubstanzgehalt von 28 bis 36 % an, was einem Feuchtegehalt von 64 % bis 72 % entspricht [40]. Je nach Maissorte und deren Abreifeverhalten können die Kolben TS-Gehalte bis zu 60 % und die Restpflanze von nur 20 % haben. Unter Berücksichtigung der trockenen Standorte oder Bereiche innerhalb eines Schlages ergibt sich die Anforderung, daß Feuchtegehalte von 30 – 80 % für Silomais erfaßt werden müssen.

In Tabelle 6 sind mögliche Erntegüter mit ihren jeweiligen Eigenschaften zum Erntezeitpunkt aufgelistet. Der angegebene Bereich für die Materialdichte beinhaltet sowohl die lose Aufschüttung als auch den verdichteten Zustand in der Maschine.

*Tabelle 6: Beschaffenheit der Erntegüter zum Bergezeitpunkt (nach: [19, 21, 22, 36, 46]).*

Material	Ernte- maschine	Dichtebereich Ernte [kg/dm <sup>3</sup> ]	Feuchtebereich Ernte [%]	Erntefeuchte ideal [%]
Anweilsilage	B, F, L	0,15 – 0,65	60 – 72	65
Flachsstroh	B	0,05 – 0,2	8 – 22	16
Heu	B, L	0,07 – 0,2	10 – 20	14
Ganzpfl.silage	F		40 – 70	
Gärheu	B, L		40 – 66	50
Maissilage	F	0,2 – 0,4	50 – 90	68
Naßsilage	B, F, L	0,3 – 0,8	> 80	
Stroh	B, L	0,05 – 0,2	10 – 25	
Zuckerrüben- blätter	L		70 – 85	80

(B = Ballenpresse; F = Feldhäcksler; L = Ladewagen)

Da nicht immer mit dem optimalen Wassergehalt geerntet wird, ist von der Meßtechnik ein größerer Bereich zu erfassen. Soll ein einziger Sensor für alle



Futtererntegüter verwendet werden, ist ein Meßbereich von 8 % bis 90 % Wassergehalt notwendig.

Weitere charakteristische Eigenschaften eines Stoffes sind die Korngröße (Partikelgröße) beziehungsweise die Schnittlänge und die Dichte. Diese nehmen während des Futterernteprozesses sehr unterschiedliche Werte an (Tabelle 7, Tabelle 8).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß die Feuchte des Materials von 8 – 90 % betragen kann. Dabei sind Dichten zwischen 0,05 und 0,5 kg/dm<sup>3</sup> vorzufinden. Die „Korngröße“ der Futtererntegüter variiert zwischen 4 mm und unzerkleinerten Pflanzen.

## **4.2 Spezifikation der Futtererntemaschinen**

Zur Bergung von Futter beziehungsweise Halmgut werden in Europa drei unterschiedliche Maschinen eingesetzt: Feldhäcksler, Ballenpresse und Ladewagen. Im Rahmen dieses Projektes stehen ein selbstfahrender Feldhäcksler sowie eine Rundballenpresse mit variabler Kammer zur Verfügung, deren Materialflußcharakteristik im folgenden aufgezeigt wird.

### **4.2.1 Materialfluß und Anbaumöglichkeiten im Feldhäcksler**

Zur Ernte 1997 und 1998 kam ein Feldhäcksler vom Typ John Deere 6710 und 1999 ein John Deere 6950 zum Einsatz. Der Weg des Materials durch die Maschine und die vorhandenen Anbauräume für Sensoren in beiden Maschinen sind identisch (Abbildung 11). Einzige Ausnahme ist die Breite des Auswurfkamins, die bei der zuletzt genannten Maschine ungefähr 60 mm mehr beträgt. Diese Änderung hat zur Folge, daß die Schichtdicke des Materialstroms im Kamin bei gleichem Durchsatz um etwa 20 % geringer wird.

Für die weitere Analyse der Materialflußeigenschaften und der Anbaumöglichkeiten für Meßtechnik wird der Materialstrom im Feldhäcksler in zehn Bereiche gegliedert (Abbildung 12). Da die Erntevorsätze je nach Erntegut wechseln, werden diese nicht mit in die Betrachtung einbezogen.

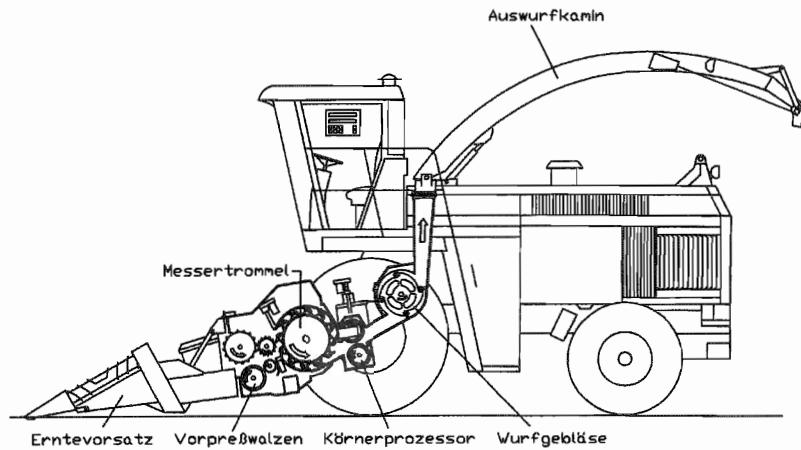


Abbildung 11: Aufbau eines selbstfahrenden Feldhäckslers [20]<sup>5)</sup>.

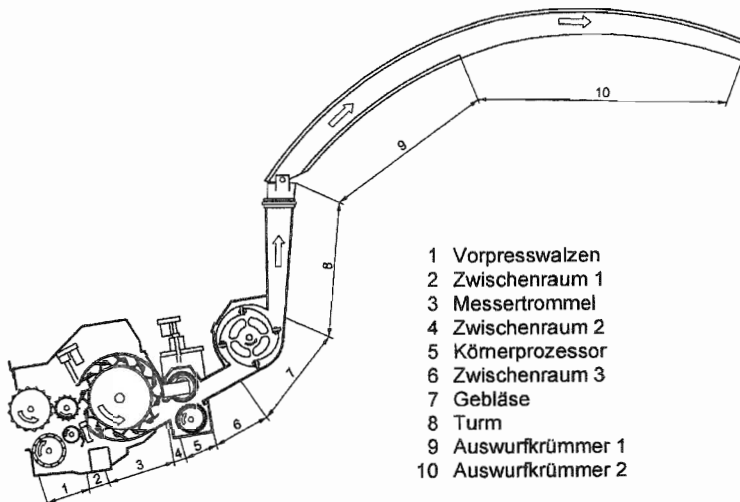


Abbildung 12: Bereiche des Materialflusses im Feldhäckslers.

<sup>5)</sup> a.a.O. Seite 9, Abbildung 3

Schnittlänge, Dichte, Schichtdicke und Materialgeschwindigkeit variieren entlang des Materialflusses. In Tabelle 7 sind die charakteristischen Parameter für den jeweiligen Materialflußbereich aufgelistet, wobei von einer optimalen Materialzuführung ausgegangen wird. Um die Zusammenhänge zwischen Schichtdicke, Dichte und Durchsatz besser veranschaulichen zu können, wurden die unterschiedlichen Schichtdicken im Bereich Auswurfkrümmen 1 in Abhängigkeit von der Dichte berechnet und graphisch dargestellt (Abbildung 13). Die Schichtdicke schwankt beispielsweise bei einem Durchsatz von 100 t/h von 10 mm bis 50 mm je nach Dichte.

Die Materialgeschwindigkeit ist dabei aus der Nennzahl des jeweiligen Aggregates berechnet. Die Werte für die Materialgeschwindigkeit im Auswurfkamin basieren auf Radarmessungen (Abbildung 21). Der verfügbare Anbauraum für Meßtechnik berücksichtigt die Platzverhältnisse an der derzeitigen Serienmaschine, ohne daß der Sensor in ein Bauteil integriert ist. Ein homogener Materialstrom läuft ohne Unterbrechungen mit konstanter Materialdichte. Der Parameter Materialausrichtung besagt, ob der Materialstrom immer kompakt an einer Seite des Kanals entlangläuft (=ideal) oder undefiniert je nach Materialbeschaffenheit verläuft (=ungünstig).

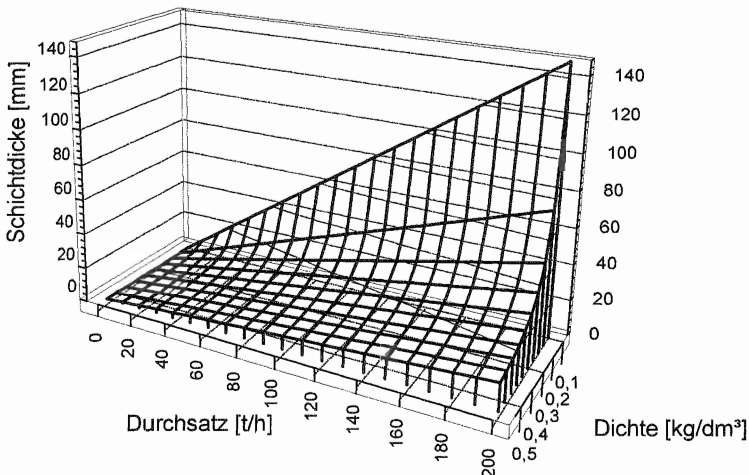


Abbildung 13: Schichtdicke im Auswurfkamin in Abhängigkeit von Dichte und Durchsatz bei einer Materialgeschwindigkeit von 100 km/h.

Tabelle 7: Bewertung von Materialstrom und Anbaumöglichkeiten von Sensoren am Feldhäcksler.

Bereich Nr.	Kanalbreite [mm]	verfügbarer Anbauraum [0 – 4]*	Materialgeschwindigkeit [m/s]	Homogenität des Stromes [0 – 4]*	Schnittlänge [mm]	Materialausrichtung [0 – 4]*
1	660	0	variabel	3	Pflanze	4
2	660	0	variabel	3	Pflanze	3
3	710	2	32	2	4,5 – 27	3
4	710	1	32	2	4,5 – 27	k. A.
5 <sup>6)</sup>	660	0	33	2	4,5 – 27	4
6	660	3	33	2	4,5 – 27	k. A.
7	506	2	43	2	4,5 – 27	4
8	506	4	43 – 34	3	4,5 – 27	2
9	260	4 <sup>7)</sup>	34 – 20	4	4,5 – 27	4
10	260	4 <sup>7)</sup>	20	4	4,5 – 27	3

(\* 0 = ungünstig (unmöglich), 1 = noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = optimal (ideal))

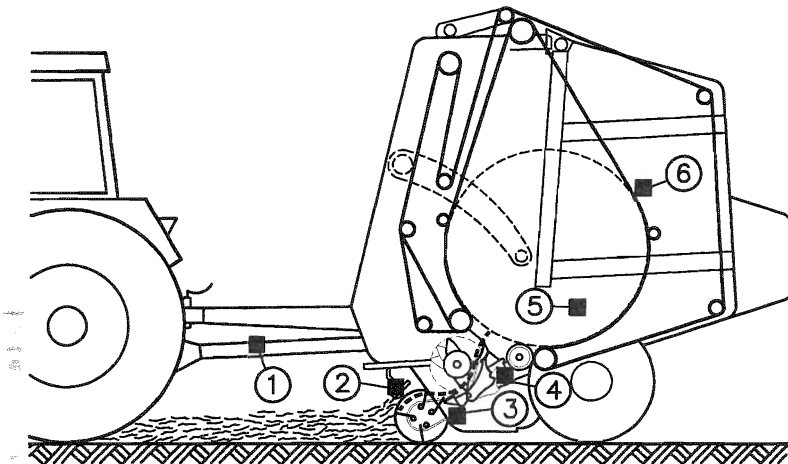
Daraus wird deutlich, daß der Bereich Auswurfkrümmer 1 (Bereich 9) die besten Voraussetzungen hinsichtlich Anbauraum und Homogenität des Häckselgutes für die Integration von Feuchtesensoren bietet.

<sup>6)</sup> Da der Körnerprozessor nicht immer eingebaut ist, wird in dieses Bauteil kein Feuchtesensor integriert.

<sup>7)</sup> Am Auswurfkrümmer ist das maximal mögliche Gewicht für einen Sensor auf 3 kg beschränkt.

#### 4.2.2 Materialfluß und Anbaumöglichkeiten in der Rundballenpresse

Im Rahmen des Forschungsprojektes stand eine John Deere Rundballenpresse Typ 580 Multicut zur Verfügung. Abbildung 14 zeigt den schematischen Aufbau dieser Maschine sowie die einzelnen Bereiche für einen Sensoranbau.



Bereich Nr.	Anbauposition
1	Deichsel (Sensor läuft auf dem Schwad)
2	Niederhalteblech (Material läuft zwischen Niederhalteblech und Pickup)
3	Pickup (zwischen Pickup und Raffer)
4	Rafferkanal (Rückwand des Kanales)
5	Ballenseitenfläche (Seitenwand der Preßkammer, in Heckklappe)
6	Ballenoberfläche (zwischen den Bändern)

Abbildung 14: Materialfluß und Sensorpositionen in der Rundballenpresse.

Bei einer Breite der Preßkammer von 117 cm und wechselseitiger Materialaufnahme ist besonders bei kleinen Schwaden unklar, an welcher Stelle entlang des Materialflusses sich zu welcher Zeit das neu aufgenommene Material befindet. Um diese Frage umfassend zu lösen, wären detaillierte Informationen über die Feuchteverteilung innerhalb eines Schwades und die Vermischung des Materials bei dem Weg durch die Presse nützlich. Da bislang keine Untersuchungen dazu bekannt sind, wird bei der Bewertung der Materialflußeigen-

schaffen in Tabelle 8 davon ausgegangen, daß das jeweils neu einströmende Material eine homogene Feuchteverteilung hat. Im Bereich der Materialaufnahme an der Presse wird wechselseitiges Fahren mit Schneidwerk angenommen, für die Preßkammer der Zustand eines verdichteten Ballens. Ansonsten werden die gleichen Parameter wie beim Feldhäcksler betrachtet.

*Tabelle 8: Bewertung der Anbaumöglichkeiten an der Rundballenpresse.*

Bereich Nr.	Kanalbreite [mm]	verfügbarer Anbauraum [0 – 4]*	Materialgeschwindigkeit [m/s]	Homogenität des Stromes [0 – 4]*	Schnittlänge [mm]	Materialausrichtung [0 – 4]*
1	-	4	max. 5 <sup>8)</sup>	1	Pflanze	1
2	2000	3	1,8	1	Pflanze	2
3	2000	1	1,8	1	Pflanze	2
4	1170	2	3,5	2	80	3
5 <sup>9)</sup>	1170	4	2,4	4	80	4
6	1170	1	2,4	4	80	4

(\* 0 = ungünstig (unmöglich), 1 = noch tragbar, 2 = ausreichend, 3 = gut, 4 = optimal (ideal))

Aus dieser Betrachtung geht eindeutig hervor, daß der beste Platz für einen Feuchtesensor in der Seitenwand der Preßkammer (Bereich Nr. 5) ist. Unter Berücksichtigung des späten Materialkontaktes und der unklaren Verteilung des neu einfließenden Erntegutes wäre eine Messung an der Ballenoberfläche günstiger (Bereich Nr. 6). Um Platz für den Sensor zu schaffen, könnte ein Riemen entfernt werden.

Die vergleichsweise große Breite des Ballens macht zu Beginn der Untersuchung den Einsatz mehrerer Feuchtesensoren verteilt über die Breite eines Ballens notwendig, um die Feuchteverteilung im Ballen erfassen zu können. Ist diese bekannt, könnte die Zahl der Sensoren eventuell reduziert werden.


<sup>8)</sup> entspricht der Fahrgeschwindigkeit des Traktors

<sup>9)</sup> Da der Sensor aus Platzgründen an diesem Pressentyp nur in der Auswurfklappe montiert werden kann, kommt ein Kontakt zwischen Ballen und Sensor erst ab einer bestimmten Ballengröße zustande, die nach ca. 20 s erreicht ist.

### 4.3 Anforderungen an die Feuchtemessung


Sind alle Eigenschaften der Futtergüter und des Materialflusses auf den Erntemaschinen bekannt, kann ein Pflichtenheft für kontinuierlich arbeitende Feuchtemeßtechnik erstellt werden (Tabelle 9). Dieses beinhaltet alle Anforderungen, die an diese Systeme gestellt werden. Die Anforderungsliste basiert auf den Ergebnissen aus Kapitel 4.1 und 4.2. Zusätzlich sind die Voraussetzungen für den mobilen Einsatz von Elektronik auf Erntemaschinen mit berücksichtigt. Die Anforderungen an die Meßgenauigkeit sind in Absprache mit Landwirten und Landmaschinenherstellern festgelegt.

Tabelle 9: Anforderungsliste.

		<b>Anforderungsliste</b> an ein kontinuierlich arbeitendes Feuch- temeßsystem für Erntemaschinen	Blatt: 1 Seite: 1
Änder.	F W	Anforderungen	Verantw.
		<p><b>1. Geometrie: Packmaße des Sensors</b></p> <p>F Breite: &lt; 270 mm</p> <p>F Höhe: &lt; 300 mm</p> <p>F Tiefe: &lt; 300 mm</p> <p>W BxHxT: &lt; 100x100x100</p> <p>F Integrierte Bauweise (alles in einem Gehäuse)</p> <p>F Ein mehradriges Kabel für Daten und Energie</p> <p><b>2. Kinematik:</b></p> <p>W Keine beweglichen Teile im Meßkopf</p> <p><b>3. Kräfte:</b></p> <p>F Sensorgewicht: &lt; 3 kg</p> <p><b>4. Werkstoffe / Materialien</b></p> <p>F Rostfrei / rostgeschützt</p> <p>F Schlagfestes Gehäuse</p> <p>F Schweißschutzschicht an Sensoroberflächen mit Materialkontakt</p> <p>W Robuste Steckverbindung</p> <p><b>5. Energie:</b></p> <p>F Spannungsversorgung: 12 V DC (erweiterte Kfz- Spezifikation)</p> <p>F Leistungsbedarf: &lt; 200 VA</p> <p><b>6. Elektronik, Meßverfahren:</b></p> <p>F Analogausgang: 4 – 20 mA</p> <p>F Datenschnittstelle: CAN ISO 11783</p> <p>F Meßfrequenz: &gt; 100 Hz</p> <p>F Integrationszeit: 1 s</p> <p>F Meßbereich: 7 – 90 % Feuchte</p> <p>F Mindestmeßgenauigkeit (absolut): ± 2 % bei Feuchtebereich &lt; 40 % ± 3 % bei Feuchtebereich 40 % bis 70 % ± 4 % bei Feuchtebereich &gt; 70 %</p> <p>F Zulassung für alle landwirtschaftlichen Betriebe</p>	Kormann

(F = Forderung; W = Wunsch)



		<b>Anforderungsliste</b> an ein kontinuierlich arbeitendes Feuch- temeßsystem für Erntemaschinen	Blatt: 1 Seite: 2
Änder.	F W	Anforderungen	Verantw.
		<p><b>7. Meßbedingungen:</b></p> <p>F Meßgut: Futtererzeugnisse (Mais, Gras, Heu, Stroh, ...)</p> <p>F Materialgeschwindigkeit: 0 bis 43 m/s</p> <p>F Materialtemperatur: 0 bis 50°C</p> <p>W Dichteunabhängigkeit</p> <p>W Schichtdickenunabhängigkeit</p> <p>W Durchsatzunabhängigkeit</p> <p>W Temperaturunabhängigkeit</p> <p><b>8. Rahmenbedingungen:</b></p> <p>F Standzeit Sensor: &gt; 5 Jahre (5000 Betriebsstunden)</p> <p>F Schutzklasse: IP 65</p> <p>F Lagertemperatur: -20 bis +80 °C</p> <p>F Arbeitstemperatur: 0 bis +60 °C</p> <p><b>9. Sicherheit:</b></p> <p>F CE Abnahme</p> <p><b>10. Montage:</b></p> <p>F Ausführung als Anflanshsystem für Serienfertigung</p> <p>F Schutz gegen Verunreinigungen am Meßsystem</p> <p><b>11. Gebrauch:</b></p> <p>W Einsatz auf verschiedenen Erntemaschinen</p> <p>W Schnelles Wechseln zwischen Maschinen</p> <p>F Systeme vorabgeglichen</p> <p><b>12. Instandhaltung / Recycling:</b></p> <p>W Wartungsfrei</p> <p>W Rücknahme der defekten Geräte durch Hersteller</p> <p><b>13. Kosten:</b></p> <p>F Preis: ≤ 3000 € bei Abnahme &gt;100 St./Jahr</p> <p><b>14. Termin:</b></p> <p>F Prototypen bis zum 01.05.2000</p> <p>F Serie ab 01.01.2003</p> <p><b>15. Sonstiges:</b></p> <p>F Lieferung in Produktfarben des Auftraggebers</p>	Kormann
A97.1KOR		Ersetzt:	

## 4.4 Auswahl geeigneter Sensortechnik

Nachdem die zu erntenden Materialien und die Materialflußbedingungen in den Erntemaschinen bekannt sind, müssen geeignete Sensoren auf dem Markt gesucht werden, die unter diesen Umständen zuverlässig die Feuchte bestimmen können. Dazu ist es notwendig, die theoretische Eignung der einzelnen Feuchtemeßverfahren zu überprüfen und anschließend nach solchen Sensoren auf dem Markt zu suchen.

### 4.4.1 Einsetzbare Feuchtemeßsysteme

Von den technisch relevanten Feuchtemeßprinzipien können nur die Systeme verwandt werden, die von ihrer Bauart her einen mobilen Einsatz auf der Maschine ermöglichen, für einen Einsatz in der Landwirtschaft zugelassen sind und den gesamten Feuchtebereich erfassen.

Als ein grundlegender Schritt zur Durchführung der Arbeit wurde zunächst eine Untersuchung der Eignung der einzelnen Meßverfahren im Hinblick auf die Feuchtemessung in Futtererntegütern gemäß der VDI Richtlinie 2225 [44] durchgeführt. Bei dieser theoretischen Betrachtung kam dem Preis der Systeme eine untergeordnete Gewichtung zu, da eine grundsätzliche Untersuchung der Machbarkeit nicht an finanzielle Grenzen gebunden sein sollte. Das Vorgehen bei dieser Bewertung und die Einzelergebnisse sind im Anhang 10.1.1 enthalten. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tabelle 10.

*Tabelle 10: Theoretische Eignung der Meßverfahren.*

Rangnummer	Meßverfahren	Gesamtbewertung (max. 4)
1	Nahinfrarot-Reflexion (NIR)	3,14
2	Mikrowellenreflexion	2,91
3	Kapazitives Meßverfahren	2,74
4	Dielektrisches Meßverfahren	2,65
5	Mikrowellenresonator	2,42
6	Mikrowellentransmission	2,37
7	Nahinfrarot- Transmission (NIT)	2,26
8	Leitfähigkeits- Messung	0,00
9	Zeitbereichsreflektometrie (TDR)	0,00

Das Kernresonanzverfahren schied aufgrund der Baugröße und des Energiebedarfs aus. Radiometrische Meßverfahren hatten keine Zulassung für Biobetriebe [32]. Somit fiel auch das Kernstrahlungsverfahren für weitere Untersuchungen in diesem Projekt weg. Bei dieser Bewertung ist ein möglicher Einfluß der Materialgeschwindigkeit außer Acht gelassen. Theoretisch dürfte sich somit die NIR-Technik am besten für die Feuchtebestimmung in Futtererntegütern eignen.

#### **4.4.2 Verfügbare Feuchtemeßsysteme**

Sensoren, die auf den in Kapitel 4.4.1 herausgefilterten Verfahren zur Feuchtemessung basieren, können demnach für den Einsatz auf Futtererntemaschinen in Betracht gezogen werden.

Die von KORMANN 1997 [20] durchgeführte Marktanalyse hinsichtlich kontinuierlich arbeitender Feuchtemeßsysteme listet etwa dreißig Hersteller einsetzbarer Technik auf. Eine aktualisierte Marktübersicht ist im Anhang 10.1.2 zu finden. Basierend auf diesen Ergebnissen ist Tabelle 11 erstellt, in welcher charakteristische Eigenschaften von Feuchtemeßsystemen eingeteilt nach ihrem jeweiligen physikalischen Prinzip zusammengefaßt sind.

Tabelle 11: Typische Eigenschaften einsetzbarer Feuchtemeßverfahren.

Meßverfahren		Leitfähigkeitsmessung	Dielektrische Messung	Kapazitives Meßverfahren	Mikrowellenmeßverfahren				Infrarotmeßverfahren	
					Transmission	Reflexion	Resonator	TDR	Transmission (NIR)	Reflexion (NIR)
Kriterium										
1	benötigter Bauraum H x B x T [mm]	70x 50x5	∅100 x70	∅100 x70	∅126 x70	∅100 x200	∅140 x70	∅80x 220	∅420 x605	∅120 x150
2	Sensorgewicht [kg]	0,5	1	1	2	3	1	1	35	5
3	Meßbereich [%]	10-40	7 – 90	0-100	0-100	0-100	0-85	5-40	0-100	0-100
4	Meßfrequenz [Hz]	100	100	100	100	100	100	0,2	0,03	100
5	Materialdurchdringung [mm]	k. A.	>50	>50	<500	>50	k. A.	k. A.	<30	<1
6	kontinuierliche Messung	ja	ja	ja	ja	ja	ja	(ja)	(ja)	ja
7	Systempreis [T€]	0,5	1,5	2	20	8	10	3	50	20
8	Rangnummer aus Tabelle 10	8	4	3	6	2	5	9	7	1

Da diese Angaben von den Herstellern stammen und dort keine Erfahrungen mit dem mobilen Einsatz der Systeme auf Erntemaschinen vorhanden sind, müssen eigene Untersuchungen diesbezüglich angestellt werden.

Aufgrund des unterschiedlichen Lieferumfangs sind die Systempreise schwer zu vergleichen. Ein System kann minimal aus einem Meßkopf mit analoger Rohwertausgabe bestehen, maximal aus Meßkopf mit Auswerteelektronik, die gleichzeitig die Möglichkeit zur Einbindung in einen Regelkreis bietet.

Die weite Preisspanne bei den NIR-Systemen kommt daher, daß sowohl reine Feuchtemeßsysteme als auch Inhaltsstoffmeßsysteme auf dem Markt sind, die abhängig von der Kalibrierung eine Vielzahl an Qualitätsparametern erfassen können.

Von den zahlreichen Firmen die kontaktiert wurden, waren nur wenige an einer Zusammenarbeit interessiert. Dank der Kooperationsbereitschaft einiger Sensorhersteller standen folgende Systeme im Rahmen des Projektes für Tests zur Verfügung (Tabelle 12).

Tabelle 12: Liste der getesteten Feuchtemeßsysteme.

Hersteller	Systembezeichnung	Labortest			Feldtest		
		1997	1998	1999	1997	1998	1999
<b>Mikrowellenreflexionssysteme</b>							
Franz Ludwig	FL H <sub>2</sub> O		x				
Hydronix	Hydro Mix		x	x			
Strandberg Eng.	Type 6711	x					
<b>Mikrowellentransmissionssysteme</b>							
BERTHOLD	Micro Moist	x					
pro/M/tec			x				
<b>NIR- Systeme</b>							
MESA electr.	MM55	x	x		x	x	(x)
Perten Instr.	DA 7000		x	x		x	x
Rütter	Quadra Beam 6500	x					
<b>Kapazitive Meßsysteme</b>							
ARNOLD	FSV		x	x			x
Liebherr	Litronic FMS	x	x		x	x	

Nachfolgend ist zu überprüfen, welches Verfahren und welches System sich am besten für den Einsatz in der Praxis auf Futtermaschinen eignet.

## 4.5 Aufbau eines Testprogramms für Feuchtesensoren

Um die unterschiedlichen Meßverfahren auf ihre Tauglichkeit zu überprüfen, wird auf den von KORMANN 1997 [20] entwickelten mehrstufigen Testplan aufgebaut. Dieser beinhaltet die in Tabelle 13 aufgelisteten Prüfaufbauten und Zielstellungen.

Tabelle 13: Ziele und Inhalte des Prüfplanes für Feuchtemeßsysteme.

Prüfstufe	Prüfaufbau	Problemstellungen / Zielstellungen
1	Laboraufbau, Materialge- schwindigkeit = 0 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Feuchtemessung in organischen Materialien?</li> <li>◆ Maximal meßbarer Feuchtebereich?</li> <li>◆ Schichtdickeneinfluß?</li> <li>◆ Dichteeinfluß?</li> <li>◆ Grundgenauigkeit der Systeme?</li> <li>◆ Erstellen von Grundkalibrierungen für unterschiedliche Erntegüter</li> </ul>
2	Laboraufbau Materialge- schwindigkeit < 5 m/s	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Einfluß geringer Materialgeschwindigkeiten?</li> <li>◆ Möglichkeiten des Sensoranbaus und der Materialzuführung?</li> <li>◆ Erweiterung der Kalibrierungen für unterschiedliche Erntegüter</li> </ul>
3	Anbau an eine Erntemaschine, Praxisbedin- gungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Meßgenauigkeit unter Praxisbedingungen?</li> <li>◆ Einfluß der Maschinendynamik?</li> <li>◆ Optimierung des Anbaus der Sensoren</li> <li>◆ Integration der Sensoren in vorhandene Ertragsmeßsysteme</li> </ul>

Die Ermittlung der Referenzwerte für die Feuchtebestimmung erfolgt für alle Prüfstufen nach dem Dörr-Wäge-Verfahren (vgl. Kapitel 2.3.1). In Anlehnung an ASAE S358.2 [3] und VDLUFA Methode 3.1 [43] sind die Proben bei einer Temperatur von 105°C bis zur Gewichtskonstanz zu trocknen. Dabei werden versuchsabhängig zwischen 100 g und 2000 g Probenmaterial verwendet. Dieses Vorgehen ist mit Saatgutherstellern und Instituten abgestimmt. Sobald nicht das gesamte Testmaterial zur Feuchteermittlung getrocknet werden kann, ist

festzulegen, wie am besten die Entnahme einer repräsentativen Probe vorzunehmen ist (vgl. Kapitel 4.5.4).

Die Prüfschritte müssen von den Sensoren der Reihe nach durchlaufen werden. Das heißt, ein Sensor wird nur dann in der nächsten Stufe getestet, wenn er die vorhergehende erfolgreich bestanden hat. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, die Ergebnisse möglichst unverändert von einer Prüfstufe in die nächste übernehmen zu können. Dies bedeutet, daß so viele Parameter wie möglich gleich bleiben sollten.

#### 4.5.1 Prüfstandversuche an ruhendem Material

In der ersten Stufe soll grundsätzlich untersucht werden, ob ein Meßverfahren beziehungsweise der spezielle Sensor zur Feuchtebestimmung in organischen Materialien geeignet ist. Dazu wird ein einfacher Aufbau genutzt, der das definierte Einbringen einer Probe in den Meßraum ermöglicht. Die charakteristischen Kenngrößen für den Einsatz eines Feuchtesensors zeigt Abbildung 15.

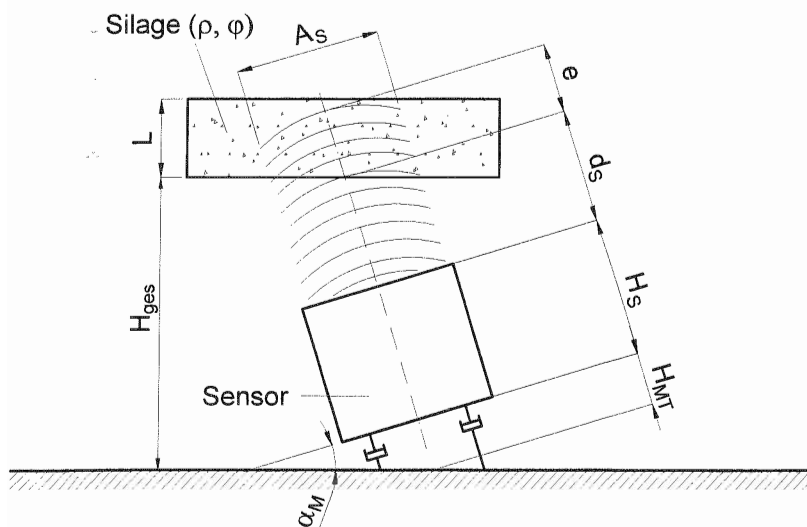


Abbildung 15: Allgemeine Definitionsgrößen für einen Feuchtesensoraufbau.

Das zu analysierende Material mit einer definierten Dichte  $\rho$  und der Feuchtigkeit  $\varphi$  befindet sich mit einer Schichtdicke  $L$  über dem Sensor. Der Abstand zwischen Sensor und Meßgut beträgt entsprechend der Herstellervorgabe  $d_S$  und die Eindringtiefe hat den Wert  $e$ . Ist dieser größer als die Schichtdicke  $L$ , so geht ein Anteil an Hintergrundmaterial (meist Luft) in die Messung mit ein. Das Ergebnis wird abhängig vom Wassergehalt des miterfaßten Materials. Ist dieses Luft, die im Vergleich zu Feststoffen wenig Wasser enthält und eine geringe Dichte hat, entsteht ein direkter Zusammenhang zwischen Meßergebnis und Schichtdicke. Die Meßfläche  $A_S$  gibt den Bereich an, der durch den Sensor erfaßt wird. In die Gesamtbauhöhe  $H_{ges}$  gehen zudem noch die Bauhöhen von Sensor  $H_S$  und Anflanschvorrichtung  $H_{MT}$  ein. Speziell für optische Meßsysteme ist der Meßwinkel  $\alpha_M$  eine wichtige Kenngröße.

Dieser Versuchsaufbau ermöglicht die Untersuchung des grundsätzlichen Verhaltens der einzelnen Meßverfahren. Dazu kommt nacheinander unterschiedlich feuchtes Material mit einer konstanten Schichtdicke in den Meßraum. Der Vergleich der Meßergebnisse mit den Referenzwerten zeigt den möglichen Meßbereich. Ebenfalls wird eine erste Aussage über die im Labor erzielbare Meßgenauigkeit möglich.

Die Einhaltung der vorgegebenen Dichte erfolgt über Meßringe, deren Volumen bekannt ist, und die jeweils mit einer abgewogenen Menge an organischem Material gefüllt werden (Anhang 10.1.3). Die eingesetzten Zylinder waren nach oben offen, um Störreflexionen zu vermeiden (Abbildung 18).

Die einzelnen Meßverfahren bedingen unterschiedliche Aufbauten, die das Einbringen von Prüfmaterial in den Meßraum gemäß Herstellervorgabe ermöglichen.



#### 4.5.1.1 Prüfaufbau für Mikrowellenreflexionssysteme

Der Abstand zwischen Sensor und Material kann für den Versuch 0 oder Vielfache von  $\lambda/2$  betragen. Ist kein direkter Kontakt zwischen Sensor und Material vorgesehen, ist ein Fenster aus nichtmetallischem Material in der Meßkammer notwendig (Abbildung 16), ansonsten liegt das Material direkt auf dem Sensor auf. Beim Einsatz von Mikrowellenmeßsystemen ist zudem darauf zu achten, daß keine Reflexionen von benachbarten Materialien zustande kommen, die das Meßergebnis beeinflussen. Für diese Versuche wird eine Plastikbox anstelle der Ringe zur Materialaufnahme verwendet.

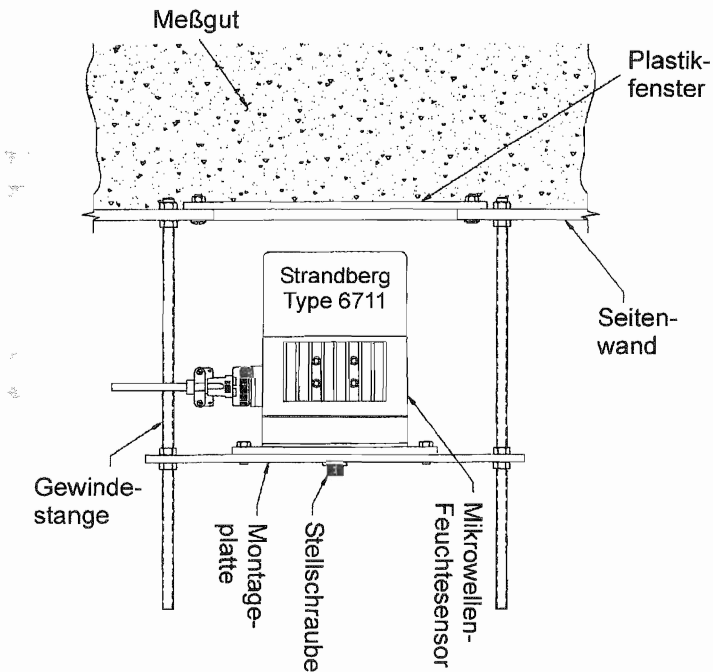


Abbildung 16: Versuchsaufbau für den Strandberg Type 6711 Mikrowellenfeuchtesensor.

Die charakteristischen Definitionsgrößen für den Einsatz von Mikrowellenfeuchtesensoren sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: Anbaudefinition der eingesetzten Mikrowellenreflexionssysteme (nach Abbildung 15).

Hersteller	Sensor	$\alpha_M$ [°]	$H_{MT}$ [mm]	$H_S$ [mm]	$d_s$ [mm]	$e$ [mm]	$H_{ges}$ [mm]
Franz Ludwig	FL H <sub>2</sub> O	0	0	170	0	60	170
Hydronix	Hydro Mix	0	0	300	0	100	300
Strandberg Eng.	Type 6711	0	20	166	0	150	186

#### 4.5.1.2 Prüfaufbau für Mikrowellentransmissionssysteme

Für Mikrowellentransmissionssysteme gelten prinzipiell die gleichen Rahmenbedingungen bezüglich des Meßaufbaus wie für die Reflexionssysteme. Hier geht die Schichtdicke immer in die Messung ein, da der gesamte Raum zwischen Sender und Empfänger ( $d_s = e$ ) durchstrahlt wird (Abbildung 17). Somit ist entweder eine konstante Schichtdicke oder eine Schichtdickenkompensation für die Feuchtemessung notwendig.

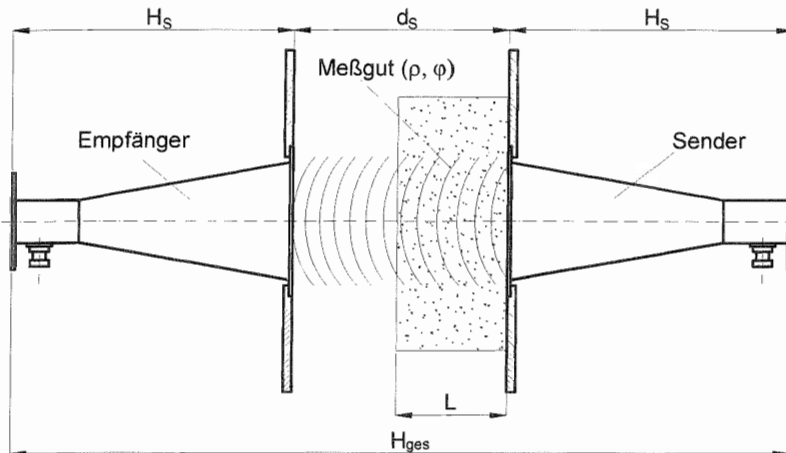


Abbildung 17: Versuchsaufbau für Mikrowellentransmissionssysteme.

Da für diese Systeme Sender und Empfänger notwendig sind, geht die Sensorbauhöhe doppelt in die Gesamtbauhöhe ein. Ebenso muß das doppelte Gewicht eingerechnet werden (Tabelle 15).

*Tabelle 15: Anbaudefinition der eingesetzten Mikrowellentransmissionssysteme (nach Abbildung 15).*

Hersteller	Sensor	$\alpha_M$ [°]	$H_{MT}$ [mm]	$H_s$ [mm]	$d_s$ [mm]	e [mm]	$H_{ges}$ [mm]
BERTHOLD	Micro Moist	0	10	260	200	200	740
pro/M/tec		0	0	50	200	200	300

Das vergleichsweise hohe Gewicht und die Bauhöhe sowie die Umgebungseinflüsse erschweren den Einsatz dieser Meßtechnik auf Erntemaschinen.

Der Einbau dieses Meßverfahrens in einen geschlossenen Metallkanal bedingt, daß die Mikrowellenstrahlen von allen Seiten stark reflektiert werden, was die Meßgenauigkeit verschlechtert. Der Einsatz von Mikrowellenabsorptionsmatten zum Abschirmen der Reflexionen an benachbarten Materialien wurde aufgrund hoher Kosten, langer Lieferzeiten und geringer Praxistauglichkeit nicht weiter in Betracht gezogen.

#### **4.5.1.3 Prüfaufbau für NIR Meßsysteme**

Nahinfrarotreflexionssysteme benötigen Sichtkontakt zum Meßgut. Somit bietet sich entweder der Einsatz über einem offenen Förderweg oder über einer Glasscheibe an. Wird die Glasscheibe mit in die Kalibrierung einbezogen, verschlechtert sich die Genauigkeit dieses Meßverfahrens nicht.

Die NIR Meßtechnik erfordert einen möglichst konstanten Abstand zwischen Meßgut und Material. Für die ersten Tests wird das Material unter einen Meßkopf gelegt, der an einem Laborständer montiert ist. Dadurch sind geringfügige Schwankungen im Abstand von Material und Meßkopf möglich. Laut Herstellerangabe beeinflussen Abweichungen von  $\pm 10\%$  die Meßgenauigkeit nicht. Um diese Fehlermöglichkeit zu eliminieren, die Einstrahlung von Fremdlicht zu verhindern und einen konstanten Meßwinkel zu haben, wird für alle weiteren Versuche der Aufbau mit Distanzrohr und Glasscheibe gewählt (Abbildung 18).

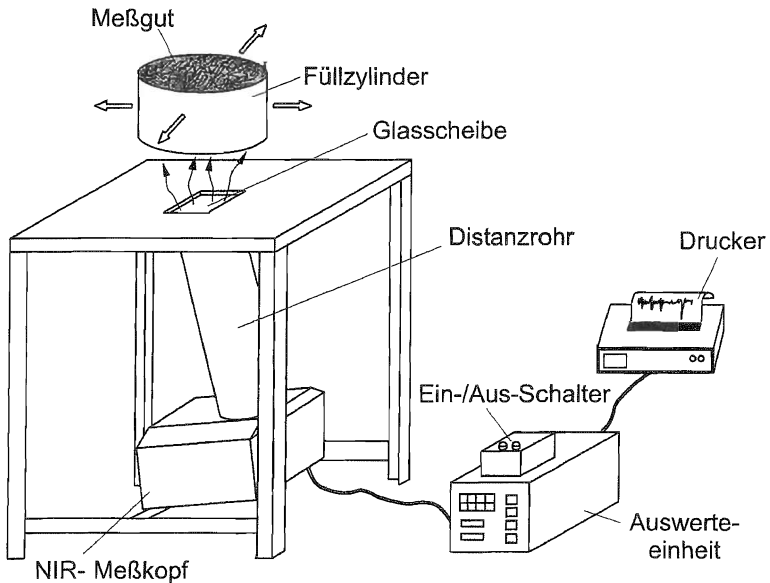


Abbildung 18: Versuchsaufbau für NIR- Feuchtemeßsysteme (MESA MM55).

Für das Projekt standen drei verschiedene NIR- Feuchtemeßsysteme zur Verfügung (Tabelle 16).

Tabelle 16: Anbaudefinition der eingesetzten NIR- Systeme (nach Abbildung 15).

Hersteller	Sensor	$\alpha_M$ [°]	$H_{MT}$ [mm]	$H_S$ [mm]	$d_s$ [mm]	$e$ [mm]	$H_{ges}$ [mm]
MESA electronic	MM55	20	10	175	200	1	450
Perten Instruments	DA 7000	0	50	130	120	1	300
Rütter	Qadra Beam 6600	20	10	178	200	1	450

Die Schichtdicke über dem Meßkopf muß ein Durchkommen von Licht (Energie) unmöglich machen. Dies ist für Maissilage ab 10 mm Schichthöhe gegeben.

#### 4.5.1.4 Prüfaufbau für kapazitive Meßsysteme

Meßaufbauten für kapazitive Meßsysteme sind denen für Mikrowellenreflexionssysteme ähnlich, nur daß kapazitive Sensoren einen direkten Kontakt zwischen Meßgut und Sensoroberfläche benötigen (Abbildung 19). Dies bedeutet, daß der Materialfluß so geführt werden muß, daß sich der Massenstrom nicht von der Sensoroberfläche ablöst. Weiter läßt sich dieses Meßverfahren nicht durch Störreflexionen von benachbarten Materialien beeinflussen.

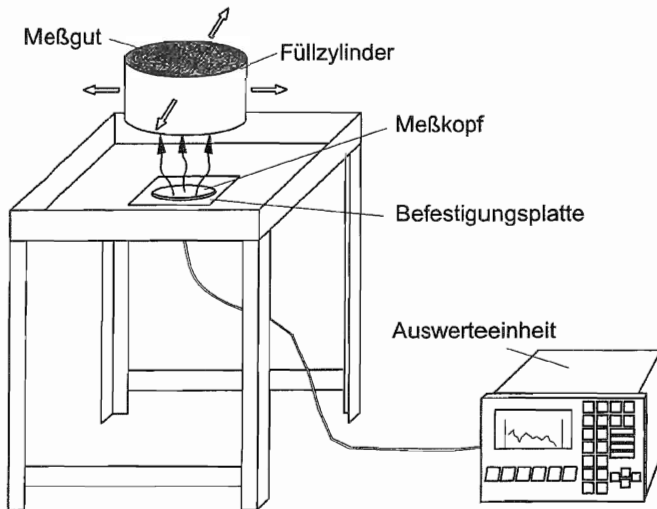


Abbildung 19: Versuchsaufbau für kapazitive Meßsysteme.

Auch für diese Meßsysteme werden Mindestschichtdicken von 60 mm und mehr benötigt, die im Feldhäcksler schwer zu erreichen sind (Tabelle 17). Möglichkeiten würden sich eventuell über eine rechnerische Schichtdickenkompensation in der Auswerteelektronik ergeben, wenn die exakte Schichtdicke bekannt ist.

Tabelle 17: Anbaudefinition der eingesetzten kapazitiven Meßsysteme  
(nach Abbildung 15).

Hersteller	Sensor	$\alpha_M$ [°]	$H_{MT}$ [mm]	$H_S$ [mm]	$d_S$ [mm]	$e$ [mm]	$H_{ges}$ [mm]
ARNOLD	FSV	0	0	65	0	> 60	65
Liebherr Mischtechnik	Litronic FMS	0	0	47	0	> 60	47

Die hier beschriebenen Meßgeometrien finden ebenfalls Einsatz in den Prüfstandversuchen der zweiten Stufe und in den Praxisversuchen. Damit können die unter definierten Bedingungen erstellten Kalibrierungen auch in der Praxis eingesetzt werden. Spätere Anpassungen aufgrund der geänderten Rahmenbedingungen sind nicht auszuschließen.

#### 4.5.2 Prüfstandversuche mit bewegtem Gut

Nachdem die grundsätzliche Eignung der einzelnen Meßsysteme für die Feuchtebestimmung in Futtererntegütern erwiesen ist, sollen der Einfluß von Materialgeschwindigkeiten und Möglichkeiten der Materialzuführung zum Sensor getestet werden. Zu diesem Zweck wird ein Prüfstand gebaut, der in einem Vorratsbehälter Meßgut aufbewahrt und dieses über eine Dosiereinrichtung gezielt abgeben kann (Abbildung 20). Die Sensoren sind an einer anschließenden Rutsche montiert, deren Neigungswinkel verstellbar ist, und erfassen das ausdosierte Material.

Aufgrund der schwierigen Materialflußeigenschaften von Häckselmaterial schlugen alle Versuche fehl, das Material kontinuierlich auszdosieren. Trotz steiler Behälterwände und verschiedenen Ansätzen das Material im Vorratsbehälter aufzulockern, rutschte das Erntegut (Maissilage) nicht kontinuierlich in die Dosierwalzen, und somit konnte auch keine homogene Schichtdicke auf der Rutsche erzielt werden.

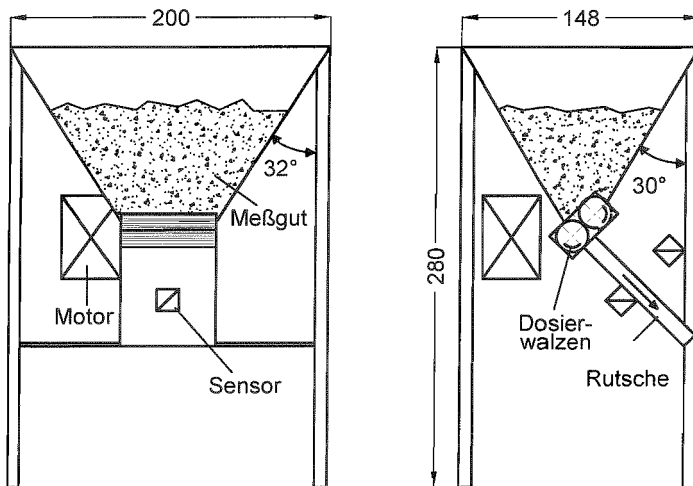


Abbildung 20: Prüfstandaufbau für Tests mit bewegtem Material.

Diese Tatsache zeigte deutlich, daß das Ausdosieren von Silage aus einem Trichter nicht möglich ist. Da auf die Testphase zwei verzichtet werden mußte, wurde gleich mit Praxisversuchen weitergearbeitet. Ein möglichst konstanter und homogener Materialstrom während der Ernte sollte ähnliche Testergebnisse wie auf dem Prüfstand liefern.

#### 4.5.3 Praxisversuche

Der Einsatz von Feuchtemeßsystemen auf Erntemaschinen erfordert zum einen die mechanische und elektronische Integration und zum anderen die rechnerische Verarbeitung der Einzelmeßwerte zu einem Gesamtwert.

Für die Praxisversuche werden ein selbstfahrender Feldhäcksler John Deere 6710 für die Ernte 1997/1998 und ein John Deere 6950 für die Ernte 1999 sowie eine Rundballenpresse John Deere 580 mit Sensorik zur Ertragsmessung ausgestattet. Ein solches Ertragsmeßsystem besteht nach AUERNHAMMER 1998 [5] immer aus einer Datenaufzeichnung, einer Positionsermittlung, einer Flächenermittlung und einer Ertragsermittlung, die der jeweiligen Erntemaschine angepaßt sein müssen.

#### 4.5.3.1 Versuchsaufbau Feldhäcksler

Der selbstfahrende Feldhäcksler wurde zunächst mit dem von AUERNHAMMER et al. 1995 [4] beschriebenen radiometrischen Meßsystemen für die Durchsatzmessung ausgestattet (Abbildung 21). Darin waren eine Strahlenquelle mit dem dazugehörigen Detektorrohr, ein Radarsensor für die Materialgeschwindigkeit im Auswurfkamin, ein Radarsensor für die Fahrgeschwindigkeit und ein DPGS Empfänger OmniSTAR 7000LR8 enthalten. Dieses System hatte eine Genauigkeit von  $\pm 4\%$  für Mais und Gras und eignete sich somit als Referenzsystem für die Massenstromermittlung.

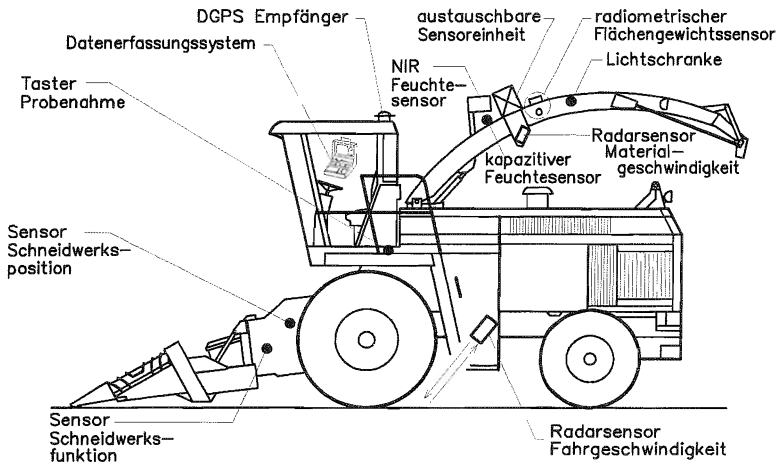


Abbildung 21: Versuchsaufbau am selbstfahrenden Feldhäcksler.

Für die Evaluierung der Feuchtemeßsysteme mußte der beschriebene Versuchsaufbau erweitert werden. Um ein exaktes Starten und Stoppen der Flächenzählung und der Mengenermittlung zu ermöglichen, war eine Lichtschranke in das System integriert, die überwachte, ob sich Material im Auswurfkamin befand oder nicht. Zudem wurden die Meßwerte von bis zu drei Feuchtesensoren, die Schneidwerksfunktion und die Schneidwerksstellung gleichzeitig erfaßt. Der NIR Sensor der Firma MESA und der kapazitive Sensor von Liebherr waren für alle Versuche eingebaut. Der modulare Aufbau für die austauschbare Sensoreinheit ermöglichte den schnellen Einbau eines beliebigen weiteren



Feuchtesensors. Somit waren bis zu drei Systeme direkt vergleichbar, da das gleiche Material nacheinander alle Sensoren passierte. Über einen Tastschalter vor der Kabine wurde ein Signal erzeugt, das in der Datendatei den jeweiligen Zeitpunkt der Probenahme erkennen ließ.

Das Datenerfassungssystem MOPS der Firma CAESAR ermöglichte das Abtasten aller Meßkanäle mit einer Frequenz von 300 Hz (Abbildung 22).

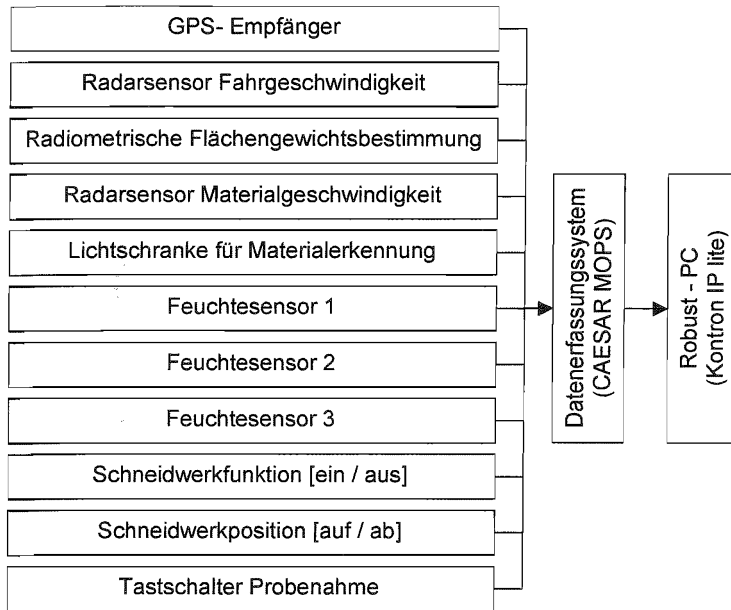


Abbildung 22: Struktur der Datenerfassung auf dem Feldhäcksler.

#### 4.5.3.2 Versuchsaufbau Ballenpresse

Die für die Versuche eingesetzte Ballenpresse John Deere 580 war mit einem ähnlichen Wiegesystem ausgestattet, wie es von WILD 1998 [47] beschrieben wurde. Deichsel und Achsstummel wurden mit DMS in Doppelbiegespannungsapplikation bestückt. Zusätzlich zu dem Versuchsaufbau von WILD befand sich an der Pickup eine Lichtschranke, die überwachte, ob Material aufgenommen wurde oder nicht. Damit konnte die aktuelle Gewichtszunahme und Feuchte gleich null gesetzt werden, wenn kein Material aufgenommen wurde. 1997 erfolgte die Integration eines Feuchtesensors in der Seitenwand der Presse. 1998 befanden sich drei Feuchtesensoren in der Rückwand des Kanals zwischen Schneidwerk und Ballenkammer (Abbildung 24). Die aktuelle Fahrgeschwindigkeit und Position kamen von einem Radarsensor und einem OmniStar 7000LR8 DGPS Empfänger, die auf dem Traktor montiert waren (Abbildung 23). Ein zweiachsiger Neigungssensor stellte Informationen über die Maschinenneigung zur Verfügung. Eventuelle Einflüsse von Hangneigungen auf die Ergebnisse sollten dadurch erkannt werden.

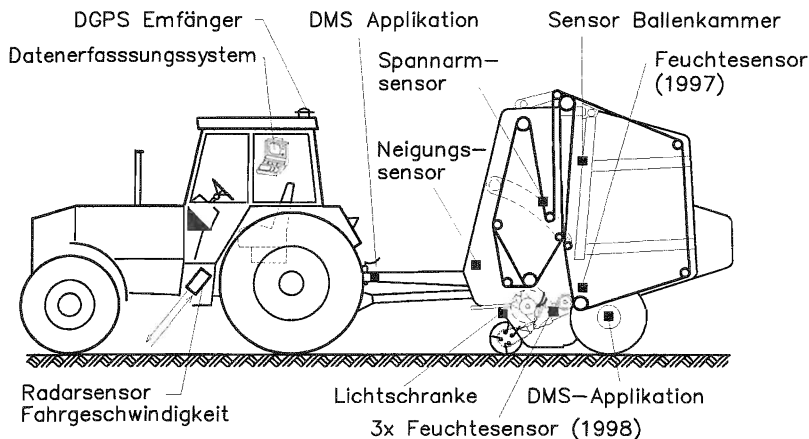


Abbildung 23: Versuchsaufbau an der Rundballenpresse.

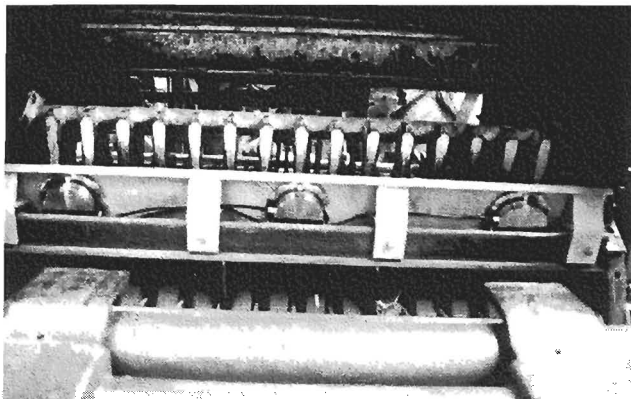


Abbildung 24: Feuchtesensoreinbau in der Rundballenpresse (1998).

Die Datenerfassung übernahm die vom Ingenieurbüro Rottmeier entwickelte Elektronik Tiger 7 (Abbildung 25). Diese gab jede Sekunde einen Datenstring bestehend aus Position, Betriebszuständen, Gewicht und Feuchte an einen Robust-PC aus, der die Daten speicherte.

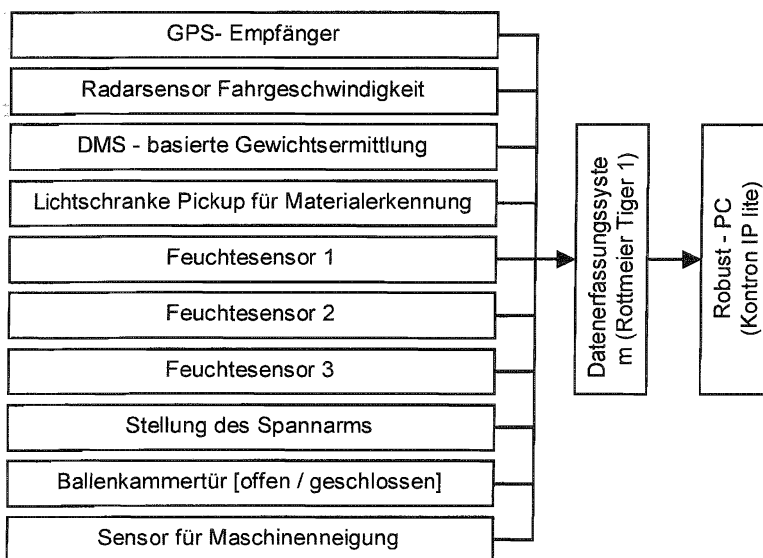


Abbildung 25: Struktur der Datenerfassung an der Rundballenpresse.

#### 4.5.4 Verfahren zur Probenahme

Um die Genauigkeit von Feuchtemeßverfahren zu ermitteln, sind Referenzmessungen notwendig, die allgemein als diese anerkannt sind. Weltweit hat sich hier das Trockenschrankverfahren durchgesetzt. Für die Laborversuche wird jeweils die gesamte Probe eingewogen und anschließend im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Danach errechnet sich die Gesamtfeuchte aus Frischmasse und Trockenmasse. Problematisch stellt sich hingegen die Probenahme bei den Praxisversuchen dar.

Im selbstfahrenden Feldhäcksler beträgt der Massenfluß 27,8 kg/s bei einem Gesamtdurchsatz von 100 t/h. Soll nun eine repräsentative Messung über 5 s durchgeführt werden, so ergibt sich ein Probengewicht von 138,9 kg. Wird die Probe nicht direkt aus dem Materialfluß entnommen, sondern aus dem Anhänger, muß eine repräsentative Probe aus der mit ungefähr 3 t vergleichsweise großen Menge gezogen werden. Beide Verfahren weisen Probleme hinsichtlich der Aussagekräftigkeit einer Probe auf. Somit muß ein Weg gefunden werden, eine repräsentative Teilprobe aus dem Materialstrom oder aus dem Anhänger zu entnehmen.

Im ersten Ansatz wurden mit Hilfe eines Rohres drei Proben je Feldlänge aus dem Auswurfkamin entnommen. Ein Tastschalter gab an das DAQ- System ein Signal, so daß später die Probe ihrem Standort zugeordnet werden kann (Abbildung 26). Die Identifizierung der Proben erfolgte dabei über fortlaufende Nummern. Nachdem sich dieses Verfahren aufgrund der Materialentmischung im Kamin als ungeeignet erwiesen hatte, wurden die Proben beim Abkippen des jeweiligen Anhängers am Silo entnommen. Fünf bis zehn Stichproben des Erntegutes des abgeleerten Anhängers kamen zum Durchmischen in ein Behältnis. Die daraus entnommene Probe hatte ein Gewicht von ein bis zwei Kilogramm und enthielt Anteile aller Stichproben. Die Ergebnisse des Vergleiches der beiden Verfahren sind in Kapitel 5.2.2 dargestellt.

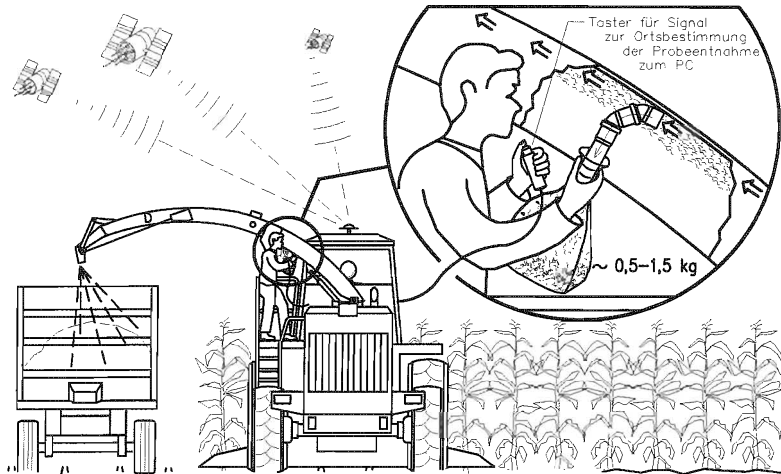


Abbildung 26: Probenahme am Feldhäcksler.

Die Probenahme an der Ballenpresse gestaltete sich dagegen einfacher. Nach dem Auswerfen des Ballens wurde jeweils das Material entnommen, das im Kanal geblieben war. Somit konnten die letzten Werte der Feuchtesensoren als die zugehörigen Werte zu den Proben genommen werden. Dabei blieb nur die Frage offen, auf welcher Seite, zu welcher Zeit, wieviel Material in die Preßkammer gelangte.

Waren die Proben gezogen, war deren Weiterverarbeitung sorgfältig durchzuführen. Die Bestimmung der Frischmasse geschah unverzüglich auf einer Waage, die eine Genauigkeit von einem Promille besaß und auf einer ebenen, stabilen Fläche aufgestellt war. Eine weitere erhebliche Fehlerquelle konnte der Einfluß von Wind auf die Waage sowie ein falsches Taragewicht der Probenbehälter sein. Dienten die Proben zur Inhaltsstoffbestimmung, mußten diese sofort getrocknet oder gekühlt werden, so daß keine Umwandlung des Materials erfolgte. Zwischen Ein- und Auswaage lag ein besonderes Augenmerk auf dem verlustfreien Handhabung dieser Proben. Die Trocknung in perforierten Tüten führte zu Bröckelverlusten, so daß bei Proben unter 1000 g Aluminiumschalen eingesetzt wurden.

## 4.6 Hard- und Software für die Datenverarbeitung

Auf dem selbstfahrenden Feldhäcksler waren sämtliche Sensoren an den mehrkanaligen Datenlogger CAESAR MOPS angeschlossen. Das vorhandene System enthielt sechzehn Analogeingänge, vier Zählereingänge und einen seriellen Dateneingang. Zudem verfügte der Kontron Iplite Robustrechner über sechs serielle Schnittstellen, die je nach Bedarf über RS232 Datenströme aufnahmen. Damit konnten die Signale aller angeschlossenen Sensoren mit der in der Software eingestellten Frequenz erfaßt werden.

Dafür wurde das Programm MicroLab der Firma Stiegele verwendet. Diese Software ermöglichte das gleichzeitige Erfassen einer Vielzahl von Kanälen mit einer beliebigen Frequenz. Die Abtastfrequenz für die Feldversuche betrug dreihundert Hertz. Aufgrund der begrenzten Festplattenkapazität des Rechners wurde für manche Versuche eine Datenreduktion auf 1 Hz basierend auf gleitender Mittelwertbildung durchgeführt. Zudem bot MicroLab die Möglichkeit, verschiedene Rechenoperationen online durchzuführen. Vom Benutzer waren die aufzuzeichnenden Kanäle und die graphische Darstellung der Werte auf dem Bildschirm zu definieren (Abbildung 27).

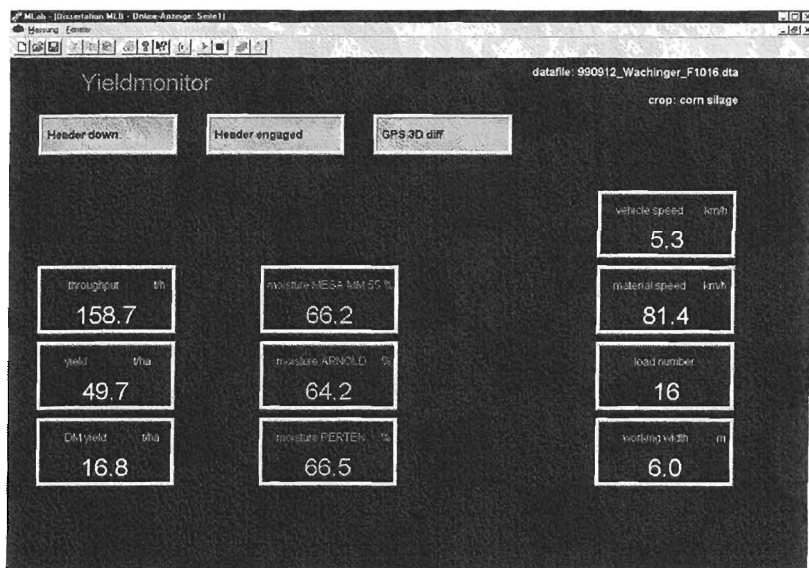


Abbildung 27: Bildschirmanzeige MicroLab Yieldmonitor.

Zur Auswertung dieser Daten diente das Programm MicroGraph. In diesem Programm war es möglich, die Daten graphisch darzustellen und weiterzuverarbeiten. Beispielsweise lief die Berechnung der Gesamtfeuchte (vgl. Kapitel 4.7.2) unter MicroLab. Abschließend konnten die Daten bei Bedarf im ASCII-Format exportiert werden, um sie in anderen Programmen weiterzuverarbeiten.

Die Wiegeelektronik Tiger 7 von Ingenieurbüro Rottmeier nutzte eine Abtastfrequenz von einhundert Herz und bildete ein Mittel aus den Werten, die innerhalb ein Sekunde aufgenommen wurden. Diese wurden dann einmal pro Sekunde zusammen mit dem GPS Datenstring an den Aufzeichnungsrechner ausgegeben. Die Auswertung dieser Daten erfolgte in Microsoft EXCEL.

## 4.7 Versuchsauswertung

Mit den beschriebenen Versuchsanstellungen wurde eine Vielzahl an Daten gewonnen, die weiterverarbeitet und analysiert werden mußten. Dazu war es notwendig, die Meßergebnisse der Sensoren mit den jeweiligen Referenzwerten zu vergleichen.

### 4.7.1 Auswertung der Meßergebnisse

Zunächst waren die absoluten Abweichungen aus der Anforderungsliste in relative Werte umzusetzen. Abbildung 28 zeigt die idealen und die erlaubten absoluten Meßwerte. Damit konnte für jeden Meßwert die zulässige relative Abweichung errechnet werden.

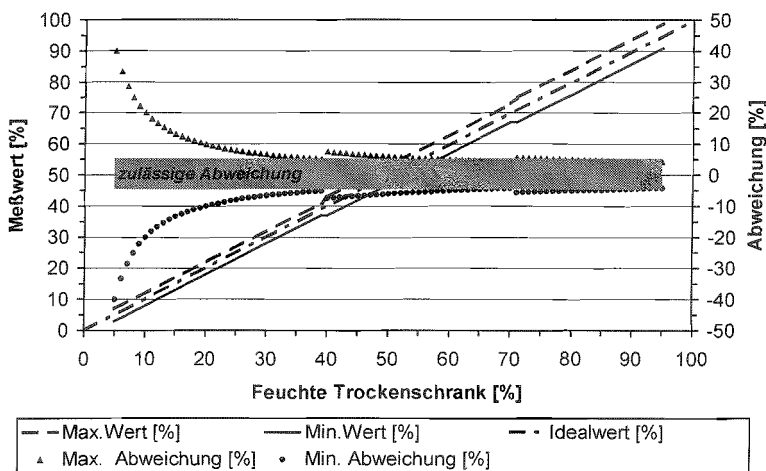


Abbildung 28: Festlegung der zulässigen relativen Abweichung.

Da für die Bewertung der Sensorgenauigkeit nur die relative Abweichung herangezogen werden sollte, war ein einheitlicher Bereich festzulegen. Dieser in Abbildung 28 grau hinterlegte Bereich lag innerhalb von  $\pm 5\%$ , um überall den Anforderungen gerecht zu werden.



Bei den Versuchen durchlief alles Datenmaterial die gleiche Prozedur, um die Ergebnisse der Sensoren mit den Referenzergebnissen zu vergleichen und zu bewerten (Abbildung 29).

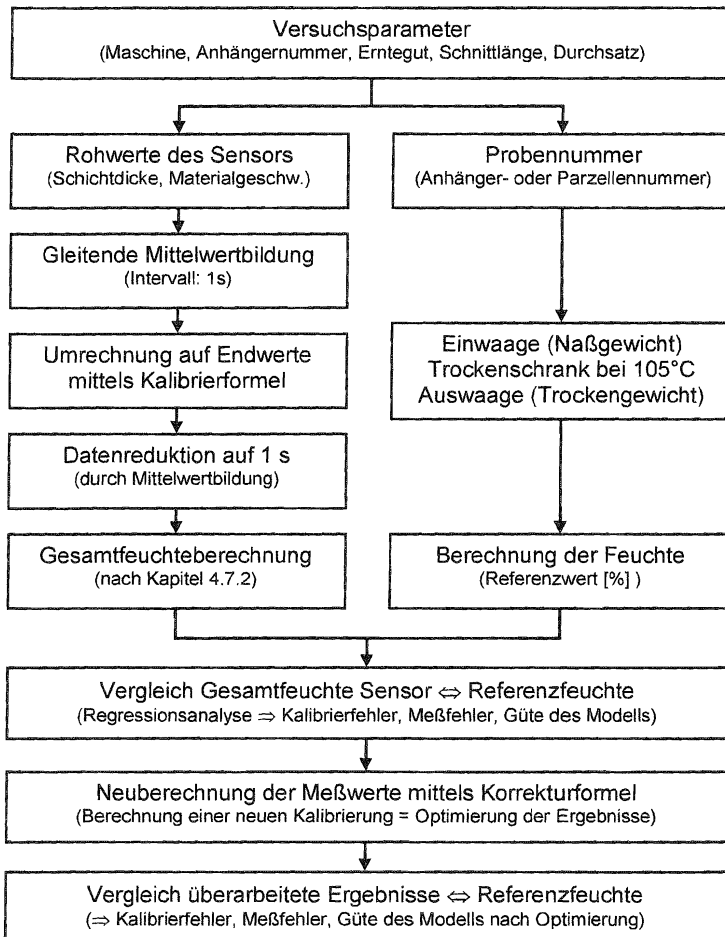


Abbildung 29: Schema zur Bewertung von Meßergebnissen aus Praxisversuchen.

Die einzelnen Meßsysteme lieferten Rohdaten, die entweder systemintern oder im DAQ-System gleitend über 1 Sekunde gemittelt wurden. Aus den Rohwerten errechneten sich mit Hilfe der integrierten Kalibrierung die Endwerte. Diese Ka-

librierung lag entweder der Auswerteeinheit des Sensorsystems oder im Datenerfassungssystem. Der Mittelwert gebildet aus den Endwerten eines Zeitintervalls von einer Sekunde bildete die Grundlage für die weiteren Berechnungen (Anhang, Tabelle 31). Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurde ein einzelner Meßwert abgelesen, im Rahmen der Praxisversuche erfolgte die Gesamtfeuchteberechnung wie in Kapitel 4.7.2 beschrieben.

Die Ergebnisse der Referenzfeuchtebestimmung mittels Trockenschrank konnten anhand der Numerierung der Proben den Ergebnissen der Sensoren zugeordnet werden.

Im nächsten Schritt galt es, beide Ergebnisse zu vergleichen und die Güte der Messungen zu bewerten. Dazu wurde die prozentuale (= relative) Abweichung zwischen Meßwert und Referenzwert bestimmt:

$$\text{Abweichung [\%]} = 100 \cdot \frac{\text{Meßwert} - \text{Referenzwert}}{\text{Referenzwert}} \quad (5)$$

Die daraus resultierende mittlere Abweichung der Meßwerte entsprach dem Kalibrierfehler und die Standardabweichung dem Meßfehler des jeweiligen Sensorsystems. Das Konfidenzniveau lag für alle Berechnungen bei 95 %, was bedeutete, daß 95 % aller Ergebnisse innerhalb der angegebenen Standardabweichung lagen.

Weiter wurde eine Regression zwischen Meßwerten und Referenzwerten berechnet. Waren die Residuen der Regression zufällig verteilt, war die Regression zulässig. Anderenfalls hätte eine Transformation erfolgen müssen. Das Bestimmtheitsmaß stellte ein Maß für die Güte der Regression dar. Je näher dieser Wert an eins lag, desto besser war die Übereinstimmung zwischen Meßwert und Referenzwert. Wurden die Meßwerte über den Referenzwerten graphisch aufgetragen, sollte die Punktwolke im Idealfall entlang einer Geraden der Steigung eins liegen.

Mittels folgender Formel errechnete sich ein Korrekturfaktor, der es ermöglichte, den Kalibrierfehler auszugleichen:

$$\text{Korrekturfaktor} = 1 + \frac{\text{Referenzwert} - \text{Meßwert}}{\text{Meßwert}} \quad (6)$$

Wurden die Korrekturfaktoren über den Meßwerten aufgetragen, konnte mit Hilfe einer Regression eine Korrekturformel beziehungsweise eine neue Kalibrierung ermittelt werden. Dabei kamen sowohl lineare als auch exponentielle Funktionen zum Tragen. Damit errechneten sich die korrigierten Meßwerte, de-

ren Güte erneut bestimmt werden konnte. Mit diesem Verfahren waren Aussagen über die theoretische Meßgenauigkeit und die Verbesserung bestehender Kalibrierungen möglich.

### 4.7.2 Berechnung der Gesamtfeuchte

Soll die Gesamtfeuchte für eine Ernteeinheit, wie beispielsweise einen Anhänger oder einen Ballen, ermittelt werden, so ist ein gewichteter Mittelwert aus den einzelnen Feuchtwerten zu berechnen. Die Gewichtung basiert dabei auf dem Massenstrom.

Der Materialstrom besteht aus einer Vielzahl von Teilmassen  $m_i$ , die sich jeweils aus einem Trockenmasseanteil und einem Wasseranteil zusammensetzen (Abbildung 30).

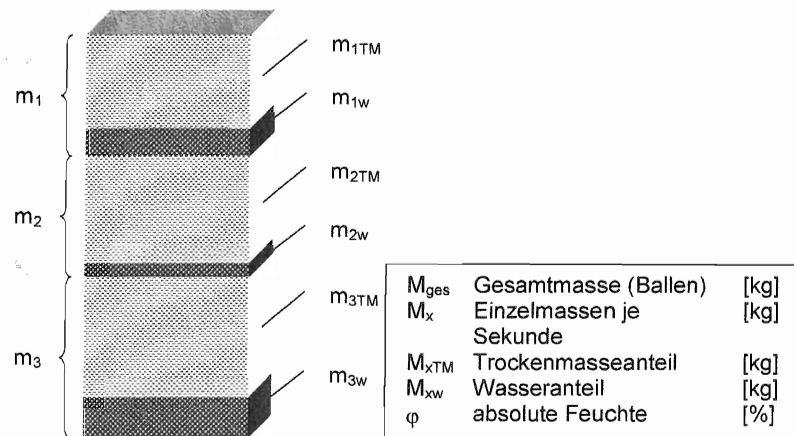


Abbildung 30: Aufbau eines Materialstromes.

Somit läßt sich die Gesamtfeuchte eines Ballens oder Anhängers wie folgt berechnen:

$$m_{ges} = m_1 + m_2 + m_3 + \dots \quad (\text{mit } 1 \leq x \leq n) \quad (7)$$

$$m_x = m_{xTM} + m_{xw} \quad (8)$$

$$m_{xW} = m_x \cdot \varphi_x \quad (9)$$

(8) in (7):

$$m_{gesTM} + m_{gesW} = m_{1TM} + m_{1W} + m_{2TM} + m_{2W} + m_{3TM} + m_{3W} + \dots \quad (10)$$

(10) –  $m_{gesTM}$  :

$$m_{gesW} = m_{1W} + m_{2W} + m_{3W} + \dots \quad (11)$$

(9) in (11):

$$m_{ges} \cdot \varphi_{ges} = m_1 \cdot \varphi_1 + m_2 \cdot \varphi_2 + m_3 \cdot \varphi_3 + \dots \quad (12)$$

$$\varphi_{ges} = \frac{m_1 \cdot \varphi_1 + m_2 \cdot \varphi_2 + m_3 \cdot \varphi_3 + \dots}{m_{ges}} = \frac{\sum_{x=1}^n m_x \cdot \varphi_x}{m_{ges}} \quad (13)$$

Daraus wird deutlich, daß die Meßgenauigkeit der Durchflußmessung direkt die Genauigkeit der Gesamtfeuchtebestimmung beeinflusst. Somit ist eine exakte Masseflußbestimmung unabdingbare Voraussetzung für die Feuchtebestimmung.

## 5 Ergebnisse

Da 1997 bei den meisten Herstellern keine Erfahrungen über den Einsatz der Feuchtesensoren bei Futtermittelgütern vorlagen, waren zunächst grundlegende Tests im Labor durchzuführen. Mangels eigener Erfahrung im Umgang mit den Sensorsystemen wurden zunächst alle Untersuchungen ohne Rücksicht auf Schichtdicke und Dichte vorgenommen, wodurch die Qualität der ersten Untersuchungen beeinträchtigt wurde. In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse und die Besonderheiten der einzelnen Versuchsanstellungen beschrieben.

Um ein besseres Verständnis für die Meßergebnisse in Bezug auf Schichtdicke und Dichte zu bekommen, diente eine theoretische Grundüberlegung zur Zunahme der Dichte in Abhängigkeit von der Zunahme der Feuchte. Dabei wurde davon ausgegangen, daß das Material das gesamte Wasser aufnimmt, ohne daß sich gleichzeitig das Volumen des Materials ändert. Ausgehend von 200 g TM und einem konstanten Volumen von 2 dm<sup>3</sup> wird die Dichte in Abhängigkeit von der Materialfeuchte berechnet. Da die Kalibrierkurve des Litronic FMS-Feuchtemeßsystems auf vier Stützpunkten basiert, wird mittels drei (Kalibrier-) Geraden versucht, diesen Zusammenhang linear darzustellen (Abbildung 31). Es zeigt sich, daß für den Bereich von kleiner 54 % Feuchte die Dichte annähernd linear mit der Feuchte zunimmt, und somit eine lineare Kalibrierung für einen dichteabhängigen Sensor einbezogen werden kann. Ähnliches gilt auch für den Bereich zwischen 54 % Feuchte und 80 % Feuchte, wobei das Bestimmtheitsmaß abnimmt. Ist die Materialfeuchte größer als 80 %, fällt das Bestimmtheitsmaß deutlich ab. In diesem Bereich ist es nicht mehr möglich, die Dichteabhängigkeit der Meßergebnisse in eine lineare Kalibrierung mit einzu-beziehen.

Darauf basierend wurden die Ergebnisse des Litronic FMS im nachhinein noch einmal neu betrachtet (Kapitel 5.1.4.2).

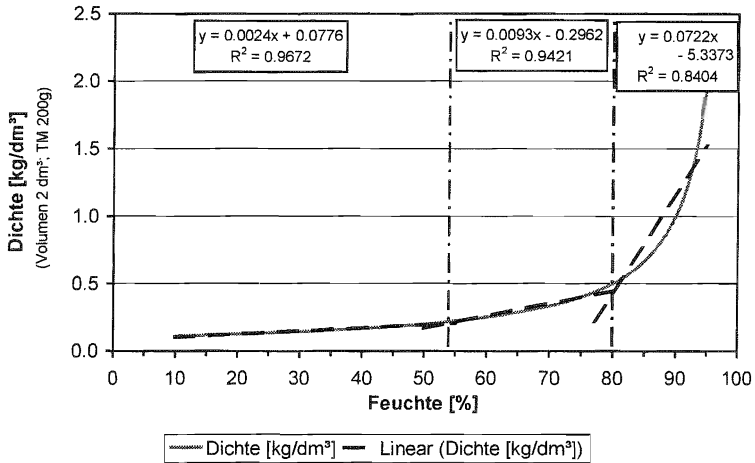


Abbildung 31: Zunahme der Materialdichte in Abhängigkeit von der Feuchte.

## 5.1 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

Um diese Untersuchungen unabhängig von der Vegetationsperiode durchführen zu können, wurde teilweise auf Maissilage aus dem Silostock zurückgegriffen. Dieses Material hatte den Vorteil, daß es eine vergleichsweise einheitliche Feuchte besaß. Soweit verfügbar, bestand das Probenmaterial aus Frischmasse direkt vom Feld. Das Vortrocknen von Futtermitteln im Trockenschrank eröffnete die Möglichkeit, Untersuchungen über einen weiten Feuchtebereich durchzuführen.

Einschränkender Faktor für manchen Sensortest war der Zeitraum, über den ein Meßsystem vom Hersteller für Tests zur Verfügung gestellt wurde. Aufgrund der begrenzten finanziellen Mittel im Projekt konnten Sensoren nicht gekauft, sondern nur geliehen werden. Die Tatsache, daß nur wenige Hersteller Sensoren für eine Evaluierung leihweise zur Verfügung stellten, schränkte die Zahl der getesteten Systeme stark ein.

### 5.1.1 Mikrowellenreflexionssysteme

Nach der Beurteilung der theoretischen Eignung der unterschiedlichen Meßprinzipien rangiert das Mikrowellenreflexionsverfahren an zweiter Stelle (Tabelle 10). Daher wurden diese Sensoren von Anfang an in die Untersuchungen mit einbezogen. Aufgrund ihrer kompakten und robusten Bauform würden sich diese Sensoren gut für den Einsatz auf Erntemaschinen eignen.

#### 5.1.1.1 Franz Ludwig H<sub>2</sub>O

Der mit Abstand leichteste Sensor dieses Meßprinzips ist werkseitig mit einem Keramikverschleißschutz erhältlich. Somit erfüllt er gleich zwei grundlegende Voraussetzungen für den Einsatz auf Erntemaschinen: leicht und robust.

1998 werden insgesamt 84 Proben unter Berücksichtigung von Schichtdicke und Materialdichte statisch getestet. Aufgrund der Geometrie des Sensors kann der Prüfaufbau für kapazitive Meßsysteme verwendet werden (Abbildung 19). Die einzelnen Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Anhang unter Tabelle 32 aufgelistet.

Ein Bestimmtheitsmaß unter 0,1 oder eine Standardabweichung von 20 % sind so ungünstig, daß die Erstellung einer Nachkalibrierung keine Verbesserung der Ergebnisse erwarten läßt.

Abbildung 32 zeigt zudem deutlich, daß eine starke Abhängigkeit von der Schichtdicke gegeben ist, die aufgrund der breiten Streuung der Ergebnisse innerhalb einer Schichtdicke aber nicht sinnvoll korrigiert werden kann. Der Versuch einer Schichtdickenkorrektur bringt lediglich eine Verringerung der Standardabweichung auf 13 % (Anhang, Tabelle 32). Damit erfüllt das System die Genauigkeitsanforderungen nicht.

Zudem kann der Feuchtesensor den Bereich kleiner 20 % Feuchte und größer 65 % Feuchte mit einer linearen Kalibrierung nicht erfassen (Abbildung 33). Dies wird deutlich, da die Rohwerte (MQ-Werte) bei geringen Feuchten immer bei etwa 0,4 liegen und bei 65 % weit zu streuen beginnen. Damit ist eine eindeutige Zuordnung eines MQ-Wert zu einem Feuchtwert unmöglich.

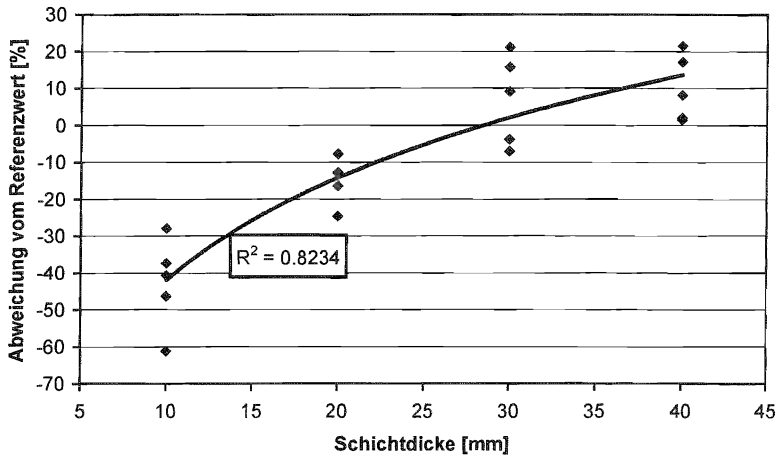


Abbildung 32: Abweichungen der Meßwerte in Abhängigkeit von der Schichtdicke für den Sensor FL H<sub>2</sub>O (n = 20).

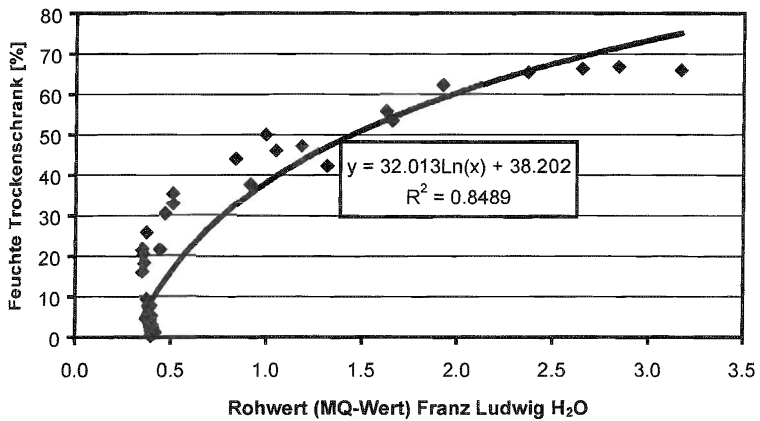


Abbildung 33: Ergebnisse der Meßbereichsuntersuchung des FL H<sub>2</sub>O (n = 54).



Der in obiger Abbildung verdeutlichte eingeschränkte Meßbereich und die Probleme bei der Schichtdickenkorrektur sind ausschlaggebend dafür, daß dieser Sensor nicht weiter in Betracht gezogen wird.

#### **5.1.1.2      *Hydronix HydroMix***

Der HydroMix Sensor von Hydronix ist ursprünglich für den Einsatz in Betonmischanlagen entwickelt worden und deshalb robust ausgelegt. Mit einem Gewicht von 8 kg ist er jedoch zu schwer, um in der Mitte des Auswurfkamins eines selbstfahrenden Feldhäcksler eingesetzt zu werden.

1998 und 1999 fanden zahlreiche Labortests mit diesem Sensor statt. Zur Analyse der Ergebnisse wurden alle Rohmeßwerte zum Hersteller geschickt. Die Daten waren im Binärformat abgelegt und konnten deshalb nicht direkt ausgelesen werden. Da von Hydronix keine Auswertungen durchgeführt wurden, können keine Ergebnisse in dieser Arbeit präsentiert werden.

#### **5.1.1.3      *Strandberg Type 6711***

Der erste Sensor dieser Art, der bereits 1997 eingesetzt wurde, ist der Type 6711 von Strandberg Engineering Ltd. (Abbildung 16). Der Abstand zwischen Sensor und Meßgut betrug 0 mm. Auf den Einsatz eines Plastikfensters wurde verzichtet, das Material lag somit direkt auf dem Sensor auf.

Mangels eigener Erfahrung wurde zunächst versucht, ohne Berücksichtigung von Materialdichte und Schichtdicke zu messen. Für die Versuche befand sich das Probenmaterial in einer Kunststoffbox (180 x 180 x 115 mm), die immer komplett gefüllt war. Damit ergab sich eine Schichtdicke von 115 mm. Der Parameter Materialdichte wurde für die einzelnen Versuche nicht dokumentiert.

Innerhalb der zwei Monate, die der Sensor zu Testzwecken zur Verfügung stand, wurden drei unterschiedliche Materialien und insgesamt 296 Proben getestet (Anhang, Tabelle 33). Um eine verlässliche Aussage über die tatsächliche Eignung des Sensors zur Feuchtemessung treffen zu können, war es wichtig, viele Proben eines weiten Feuchtebereiches zu testen. Bei der Versuchsreihe Mais 3 mit 80 Proben wurde versucht, eine Korrekturformel zu ermitteln (Abbildung 34).

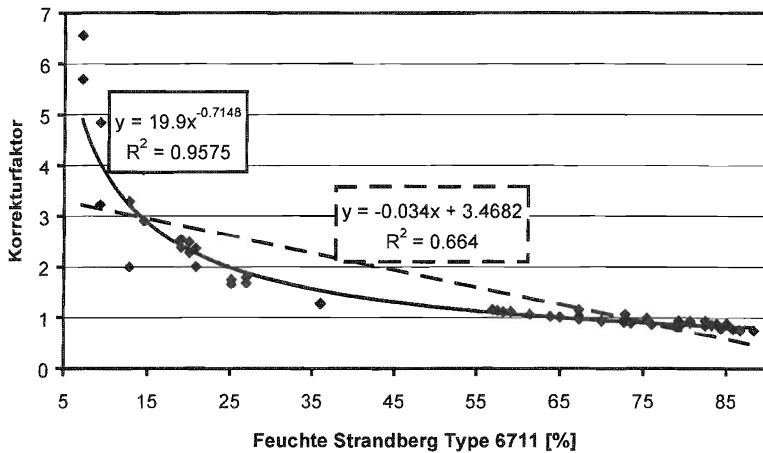


Abbildung 34: Ermittlung einer Korrekturformel zur Versuchsreihe Mais 3 ( $n = 80$ ).

Daraus war deutlich ersichtlich, daß sich die Exponentialfunktion am besten als Korrekturfunktion eignete. Wurden die Meßwerte mit dieser Funktion korrigiert, ließ sich das Gesamtergebnis verbessern (Abbildung 35). Trotzdem war die Genauigkeit für den Einsatz im Feldversuch nicht ausreichend.

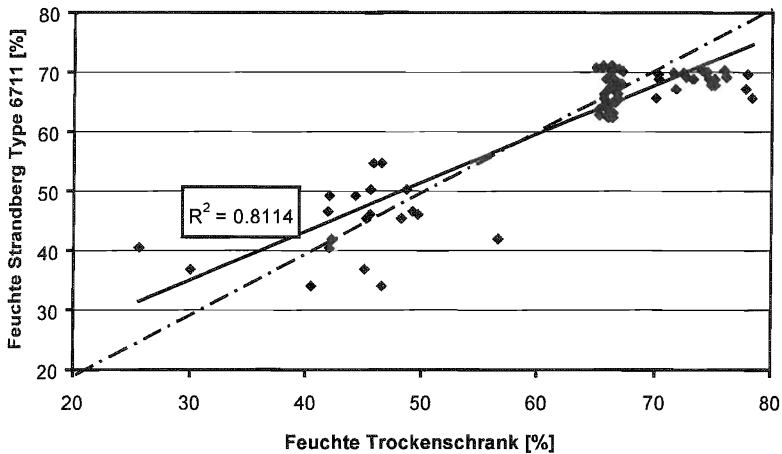


Abbildung 35: Korrigierte Ergebnisse der Versuchsreihe Mais 3 ( $n = 80$ ).

Es wäre notwendig gewesen, mit diesem Sensor weitere Versuche unter exakter Berücksichtigung von Schichthöhe und Materialdichte durchzuführen. Dies war aber nicht möglich, da der Sensor nur kurzzeitig zur Verfügung stand. Zudem ist für diesen Sensor laut Herstellerangabe eine Mindestbedeckung mit Material von einhundert Millimetern notwendig, die in der Praxis bei einem selbstfahrenden Feldhäcksler nie erreicht werden kann.

### 5.1.2 Mikrowellentransmissionssysteme

Der Laboraufbau der Mikrowellentransmissionssysteme glich mit einem Abstand von 200 mm zwischen Sender und Empfänger den Gegebenheiten, die auf dem Feldhäcksler anzutreffen wären. Die offene Konstruktion ermöglichte das Einbringen der Probe in den Meßraum (Abbildung 17). Die angezeigten Werte waren von der Umgebung abhängig. So beeinflussten Personen, die sich im Umkreis des Sensors aufhielten, und reflektierende Metalloberflächen das Meßergebnis.

Trotz Unterstützung der Hersteller konnten sowohl das Micro Moist Feuchtemeßsystem der Firma Berthold als auch das System von Pro/M/tec im Labor nicht so eingerichtet werden, daß brauchbare Ergebnisse erzielt wurden.

Zudem arbeiten diese Meßverfahren laut Angabe der Sensorhersteller bei Materialgeschwindigkeiten größer 60 km/h nicht mehr. Damit schied dieses Meßverfahren für weitere Untersuchungen aus.

### **5.1.3 NIR-Systeme**

Nach der theoretischen Beurteilung der Meßverfahren stellt das NIR Verfahren die geeignetste Möglichkeit zur Feuchtemessung in Futtererntemaschinen dar.

Eine Einschränkung beim Einsatz von NIR- Feuchtemeßsystemen ist die geringe Eindringtiefe in das Material (< 1 mm). Deshalb muß sichergestellt werden, daß der Meßkopf eine repräsentative Mischung des geförderten organischen Materials abscannen kann. Zudem können Farbe und Struktur des Meßgutes einen Einfluß auf die Ergebnisse haben. ZSCHEISCHLER 1979 [49] beschreibt die Bestandteile einer Maispflanze zu verschiedenen Erntezeitpunkten. Daraus wird ersichtlich, daß der Masseanteil an Lieschen und sehr trockenen Bestandteilen bei der Silomaisernte vernachlässigbar gering ist. Somit ist es zulässig, die schwereren Bestandteile der Maispflanze durch die NIR Meßtechnik zu erfassen und trotzdem repräsentative Ergebnisse zu erwarten.

#### **5.1.3.1 MESA MM55**

Von Anfang an stand für Laboruntersuchungen ein MESA MM55 System zur Verfügung. Im ersten Versuchsjahr befand sich der Meßkopf an einem Laborständer in dem vom Hersteller angegebenen Winkel und Abstand zum Meßgut (Abbildung 36). Dieses lag in einer runden Kunststoffschale unter dem Meßpunkt, die von Hand während des Versuchs langsam gedreht wurde. Da bei NIR-Systemen die Schichtdicke und die Dichte keine Auswirkung haben, wurde nur darauf geachtet, daß der Probenteller ausreichend gefüllt war, so daß kein Licht durchstrahlen konnte. Aus allen Einzelmessungen für eine Probe errechnete das System den Mittelwert.

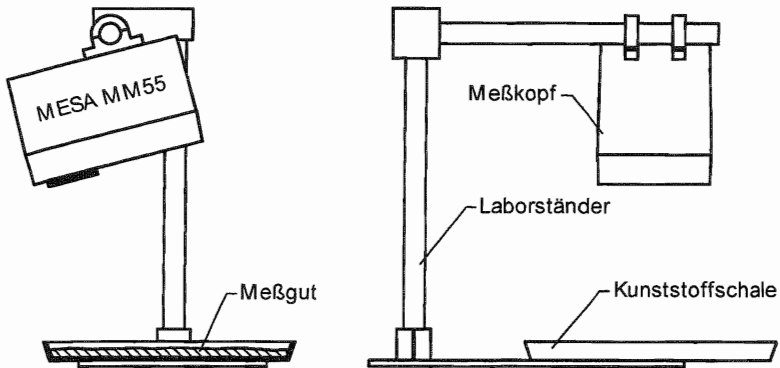


Abbildung 36: Laboraufbau des MESA MM55 1997.

Der Sensor arbeitet mit einem Filterrad. Die Meßwellenlänge für den Hochfeuchtebereich von 30 bis 95 % liegt bei 1445 nm und für den Niedrigfeuchtebereich von 6 % bis 45 % bei 1930 nm. Im Jahr 1997 stellt Mesa den Algorithmus 3 für den Hochfeuchte-Bereich auf Kanal B und den Algorithmus 13 für den Niedrigfeuchte-Bereich auf Kanal A ein. Ab 1998 kommt der Algorithmus 0 auf Kanal A für den Hochfeuchte-Bereich und der Algorithmus 3 für den Niedrigfeuchte-Bereich auf Kanal B zum Einsatz. Die Algorithmen beinhalten von MESA entwickelte Grundkalibrierungen. Werden Daten für die Kalibriererstellung erfaßt, wird parallel mit beiden Meßkanälen gearbeitet. Darauf basierend erfolgt die Erstellung materialspezifischer Kalibrierungen mit Hilfe der Software CALCOR. Diese Arbeit wird von Mitarbeitern der Firma MESA durchgeführt.

Die Kalibrierungen und Genauigkeitsuntersuchungen wurden mit Maissilage durchgeführt (Anhang, Tabelle 34). Bereits mit 30 Proben der Versuchsreihe Mais 2 zeigte das Meßsystem eine Standardabweichung von  $\pm 1,0$  % (Abbildung 37). Daraus wird deutlich, daß dieses System mit relativ wenigen Proben gut kalibriert werden kann, wenn das verfügbare Probenmaterial einen ausreichenden Feuchtebereich abdeckt.

Bei der Versuchsreihe Mais 3 wurde für Kanal A eine falsche Kalibrierung verwendet, so daß auch eine Neukalibrierung keine akzeptablen Werte brachte. Ansonsten zeigten die ersten Tests, daß das MESA MM55 System mit einer

Anzahl von über 30 Proben aus einem geeigneten Feuchtebereich schnell zu kalibrieren war.

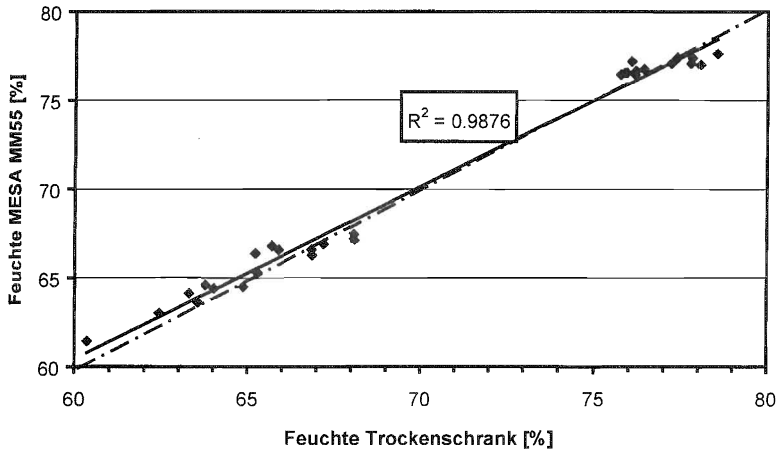


Abbildung 37: Ergebnisse des MESA MM55 aus Mais 2 nach Neukalibrierung ( $n = 30$ ).

Wegen der Grundkalibrierung nach der Versuchsreihe Mais 2 konnten die Ergebnisse des Kanal B der Mais 3 Reihe als Validierung der vorangegangenen Kalibrierung angesehen werden. Das Ergebnis fiel mit einer Standardabweichung von 2,42 % bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,921 sehr gut aus. Die Nachkalibrierung der Ergebnisse aus Mais 3 ergab eine Trendlinie, die dem Ideal sehr nahe kam (Abbildung 38).

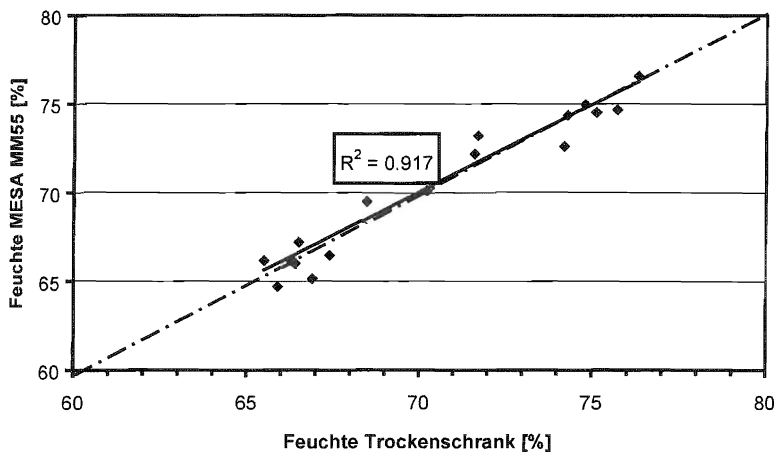


Abbildung 38: Ergebnisse des MESA MM55 aus Mais 3 nach Neukalibrierung ( $n = 20$ ).

Neben Mais wurden im ersten Jahr auch Versuche mit Gras und Hanf gefahren, deren Einzelergebnisse im Anhang zu finden sind (Tabelle 35).

Aufgrund des sehr begrenzten Feuchtebereichs und der geringen Anzahl an Proben konnte keine stabile Kalibrierung aufgestellt werden. Die sehr niedrigen Bestimmtheitsmaße erlaubten keine weiteren Aussagen über die Genauigkeit des Systems für diese Erntegüter. Eine weitere Berechnung mittels CALCOR entfiel somit. Durch eine unterschiedliche Schichtdicke des Materials von maximal  $\pm 10$  mm während der Versuche und der damit verbundenen Abstandsänderung zwischen Meßkopf und Meßgut resultierte keine Beeinflussung der Meßergebnisse. Dagegen verfälschten größere Materialteile, wie beispielsweise Blätter, das Meßergebnis deutlich, sofern diese in den Meßfleck gelangten.

Nachdem sich in den Praxisversuchen 1997 deutlich gezeigt hatte, daß die Montageposition des MM55 am Feldhäcksler ungünstig war, wurde auch der Laboraufbau geändert. Für die weiteren Tests wurde der in Abbildung 18 dargestellte Meßaufbau eingesetzt.

Der Unterschied zum vorherigen Aufbau bestand in der Glasscheibe im Meßfeld. Vorteilhaft war der allzeit konstante Abstand zwischen Meßkopf und Meß-

gut, der garantiert erhalten blieb, so lange das Material an der Glasscheibe anlag. Auch mit diesem Versuchsaufbau wurden zunächst Messungen im Labor durchgeführt. Die Ergebnisse der Untersuchungen bestätigten die 1997 erzielten Genauigkeiten.

Anhand der Ergebnisse wurde deutlich, daß das MESA MM55 System mit einem Algorithmus in der Lage war, über einen weiten Feuchtebereich den Anforderungen entsprechende Meßwerte zu liefern (Abbildung 39). Die hohe Standardabweichung der Versuchsreihe Gras 4 lag in dem weiten Feuchtebereich begründet. Es wurde ersichtlich, daß der MESA Sensor Probleme bei einem Wassergehalt unter 6 % hatte und daß in diesem Niedrigfeuchtebereich sehr schnell relative Abweichungen von über 400 % möglich waren. Dies wirkte sich wiederum auf die Standardabweichung aus.

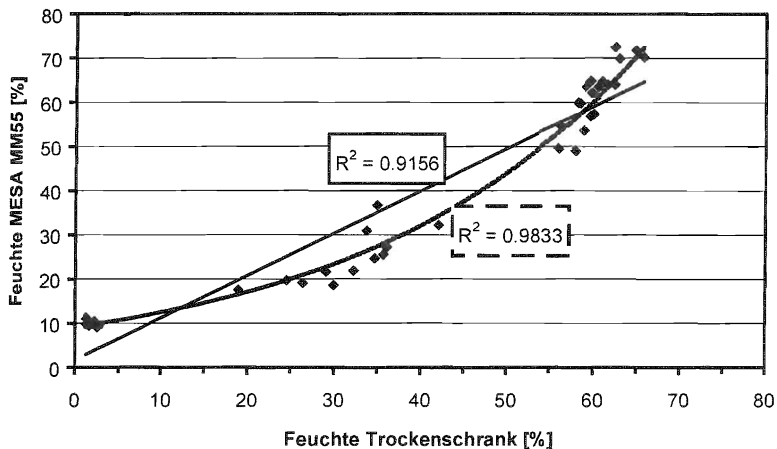


Abbildung 39: Ergebnisse des MESA MM55 (Kanal B) aus Gras 4 nach Neukalibrierung ( $n = 38$ ).

Ein höheres Bestimmtheitsmaß resultierte aus der Korrelation der Sensorergebnisse zu den Trockenschrankergebnissen bei Anwendung einer nichtlinearen Trendlinie. Eventuell eignete sich die gewählte lineare Kalibrierung nicht optimal für die Messung in Gras.



Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,935 und einer Standardabweichung von 5,55 % wurde in der Versuchsreihe Mais 4 ein über den gesamten Feuchtebereich sehr gutes Ergebnis erzielt (Abbildung 40).

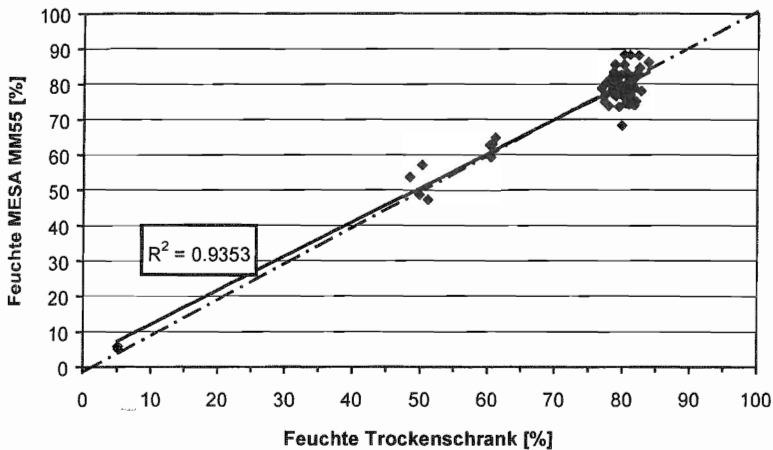


Abbildung 40: Ergebnisse des MESA MM55 (Kanal A) aus Mais 4 nach Neukalibrierung ( $n = 64$ ).

Mit diesen Laborversuchen ist bewiesen, daß das Einbringen einer Glasscheibe in den Meßbereich des MESA MM55 Sensors keine deutliche Verschlechterung der Ergebnisse mit sich brachte. Die Trendlinie in Versuchsreihe Mais 4 Kanal A lag der Idealgeraden sehr nahe, so daß diese Kalibrierung auch für weitere Feldversuche genutzt wurde. Algorithmus 0 stellte sich als der geeignetere Algorithmus für Feuchtemessung an Silage heraus.

### 5.1.3.2 Perten DA 7000

Trotz des hohen Anschaffungspreises von € 57200.- wurde das Dioden Array System der Firma Perten sowohl für Labortests als auch für Praxistests eingesetzt. Dieser Sensor enthielt keine beweglichen Teile und tastete mit einer Rate von 1000 Hz das Meßgut ab, was für den mobilen Einsatz auf Erntemaschinen vorteilhaft war. Das DA 7000 arbeitete im Wellenlängenbereich von 400 bis 1700 nm. Da immer das gesamte Spektrum aufgezeichnet wurde, konnten neben Wasser auch andere Parameter analysiert werden (Abbildung 41). Je höher der Wassergehalt, desto höher war die Absorption. Der Wasserpeak bei ungefähr 1450 nm ist deutlich zu erkennen.

Die Versuche und Referenzmessungen wurden an der Landtechnik Weihenstephan durchgeführt, die Kalibrierung und Darstellung der Ergebnisse übernahm die Firma Perten.

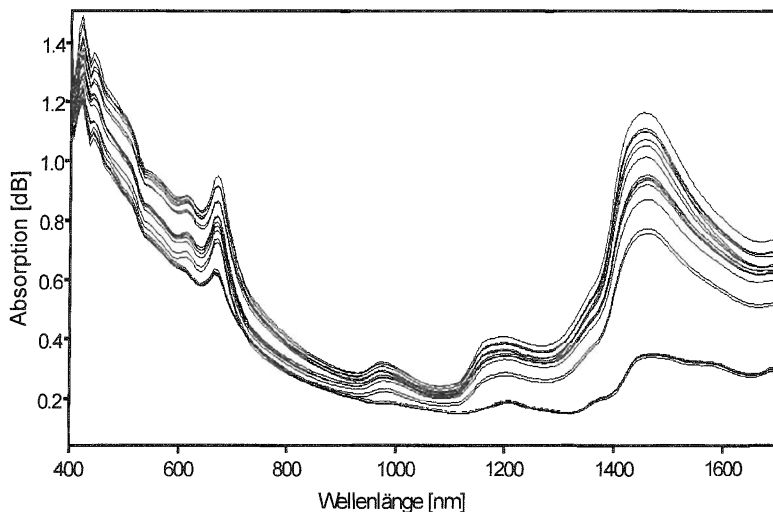


Abbildung 41: Überlagerte Spektren des Perten DA7000 von 67 Proben Maissilage.

Für die Laborversuche wurde der von Perten mitgelieferte Versuchsaufbau verwendet. Die Proben lagen auf einem Probenstisch in 120 mm Abstand zur Optik. Die Messung erfolgte durch eine spezielle Quarzglasscheibe, die später auch in den Praxisversuchen zum Einsatz kam. Um die Meßwerte zu erfassen, wurde jede Probe 15 mal gescannt, wobei die Probe in der Schale fünfmal neu gemischt wurde (3 Wiederholungen bei 5 Neuaufgaben). Der Sensor erfaßte somit mehr Oberfläche des Materials. Daraus resultierte eine höhere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Während der Labortestphase 1998 zeigten sich aus 67 Proben die besten Laborergebnisse, die insgesamt ermittelt wurden, mit einer Standardabweichung von 0,6 % und einem Bestimmtheitsmaß von 0,99 (Abbildung 42). Das Probenmaterial wies Feuchtegehalte zwischen 1 % und 67 % auf.

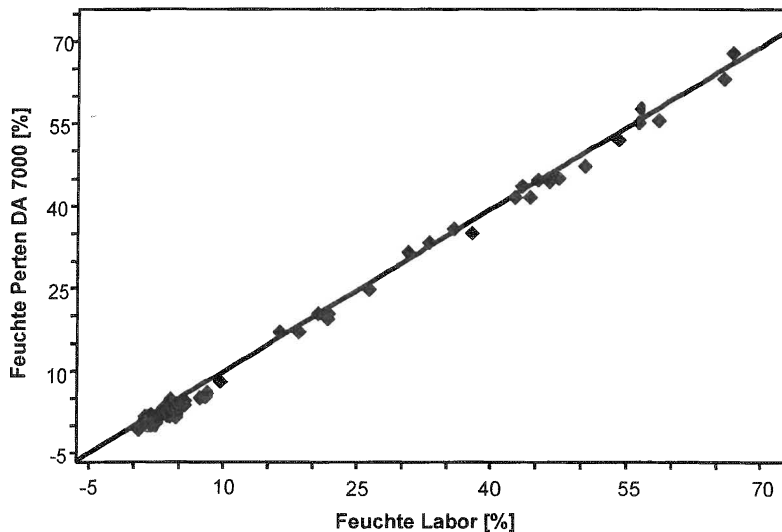


Abbildung 42: Laborergebnisse Perten DA 7000 aus 67 Proben Maissilage.

Im darauffolgenden Jahr wurde eine Laboruntersuchung zur Stickstoffbestimmung in Gras durchgeführt. Das getrocknete und gemahlene Probenmaterial wurde mit dem beschriebenen Laboraufbau untersucht. Die Standardabwei-

chung der Ergebnisse aus diesem Versuch betrug 4,53 %, was einer absoluten Abweichung von  $\pm 0,123$  % entsprach (Abbildung 43).

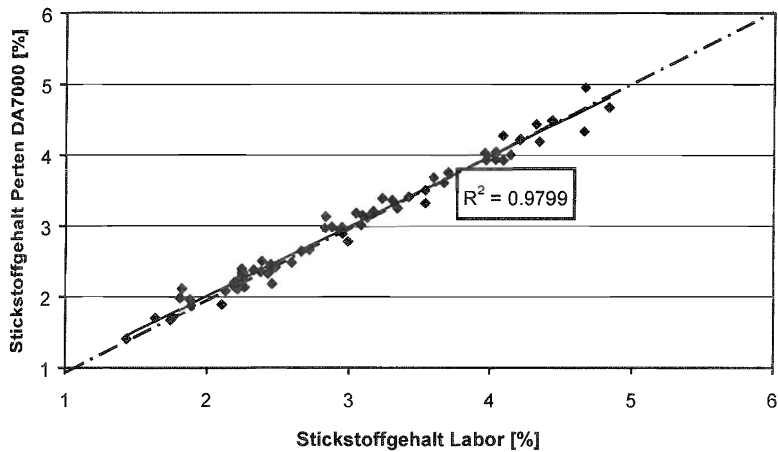


Abbildung 43: Ergebnisse des Perten DA7000 von der Stickstoffgehaltsbestimmung von Grasproben im Labor ( $n = 69$ ).

Diese hervorragenden Ergebnisse begründeten den Entschluß, den Sensor auf dem selbstfahrenden Feldhäcksler einzusetzen.

### 5.1.3.3 *Rütter Quadra Beam 6500*

Ähnlich dem MESA MM55 Feuchtemeßsystem bestand das Rütter Quadra Beam 6500 aus einem Meßkopf mit Filterrad und einer Auswerteeinheit. Die geometrische Anordnung entsprach der der ersten Versuche mit dem MESA System, nur daß der Meßwinkel  $0^\circ$  betrug. Das Meßgut lag wiederum in einer Schale, die unter dem Meßfleck bewegt wurde. Während einer Messung wurde das Material nicht umgeschichtet, was den Umfang der erfaßten Oberfläche vergrößern würde, aber in der Praxis nicht vorkommt. Da die eingesetzten NIR Systeme nur die Oberfläche des Materials scannten, wurden Dichte und Schichtdicke nicht berücksichtigt.

Alle Meßwerte waren im System gespeichert. Somit konnte nach Eingabe der dazugehörigen Referenzwerte eine Kalibrierung des Systems erfolgen. Das Kalibrierprogramm führte intern eine lineare Regression durch.

Der Versuch Mais 1 zeigte, daß über den weiten Feuchtebereich keine einheitliche lineare Kalibrierung verwendet werden konnte (Anhang, Tabelle 37). Über einen eingeschränkten Feuchtebereich erfüllte dieses NIR- System die Anforderungen (Versuchsreihe Mais 2). Nach Neukalibrierung erfolgte der Versuch Mais 3, der eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bewies (Abbildung 44).

Gras 1 zeigt ebenfalls die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Der sehr eingeschränkte Feuchtebereich ließ allerdings keine Neukalibrierung zu. Die Zusammenfassung aller Ergebnisse des Rütter Quadra Beam 6500 sind in Tabelle 37 enthalten.

Da das MESA MM55 Feuchtemeßsystem die besseren Ergebnisse lieferte, wurde in den weiteren Jahren nur noch mit diesem NIR-Filterrad-System gearbeitet.

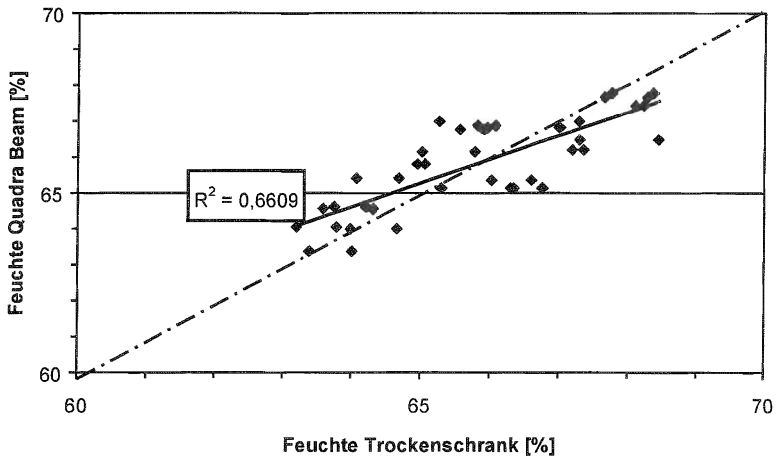


Abbildung 44: Korrigierte Ergebnisse des Rütter Quadra Beam aus Mais 3  
(n = 40).

#### 5.1.4 Kapazitive Feuchtemeßsysteme

Die kapazitiven Feuchtemeßsysteme unterliegen laut dem Stand des Wissens einem starken Einfluß von Dichte und Schichtdicke, der aber für eine kontinuierliche Messung an organischen Materialien nicht bestätigt war. Somit wurden grundlegende Untersuchungen angestellt, um die Tauglichkeit dieses vergleichsweise kostengünstigen Meßverfahrens hinsichtlich der Anforderungsliste zu überprüfen.

##### 5.1.4.1 ARNOLD FSV

Für die Laboruntersuchungen wurde der Sensor in den in Abbildung 19 dargestellten Aufbau eingesetzt. Der erste Versuch, dieses Feuchtemeßsystem unter konstanten Bedingungen (Schichtdicke 30 mm und Dichte 0,3 kg/dm<sup>3</sup>) zu kalibrieren, zeigte im Feuchtebereich zwischen 22 % und 67 % eine Standardabweichung von 10,69 % bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,813.

Im zweiten Test 1998 ließ sich die Schichtdicken- und Dichteabhängigkeit der Ergebnisse dieser kapazitiven Meßsonde gut herausarbeiten. Dazu wurde bei

Dichten von  $0,3 \text{ kg/dm}^3$  und  $0,4 \text{ kg/dm}^3$  die Schichtdicke von 10 mm bis 100 mm variiert. In die Darstellung (Abbildung 45) gingen die Mittelwerte aus jeweils fünf Wiederholungen ein. Hier zeigte sich deutlich, daß der Meßwert bei höherer Dichte immer größer war als bei niedrigerer, und daß ab einer Schichtdicke von 50 mm die Meßwerte nicht mehr stiegen.

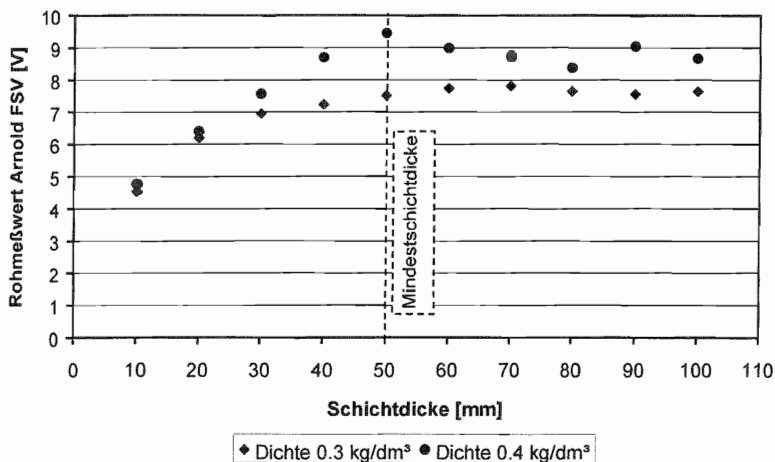


Abbildung 45: Schichtdicken- und Dichteabhängigkeit der Meßergebnisse der Arnold FSV Sonde bei Mais.

Nachdem diese Ergebnisse bekannt waren, wurde von der Firma Arnold eine Sonde (FSV 2) zur Verfügung gestellt, deren Eindringtiefe nur noch 20 mm betrug und deren Schichtdickenabhängigkeit deutlich weniger war. Der Dichteinfluß blieb damit jedoch erhalten.

#### 5.1.4.2 *Liebherr Litronic FMS*

Über einen Zeitraum von drei Jahren wurde das kapazitive Feuchtemeßsystem Litronic FMS getestet. Dieses besteht aus einer Meßsonde mit Keramik Verschleißschutz und einer Auswerteeinheit. Das gesamte System wurde für die Zementindustrie entwickelt und kann die Signale von bis zu 20 Sensoren gleichzeitig erfassen sowie Steuersignale für nachgeschaltete Anlageneinheiten ausgeben.

Die Kalibrierung des Sensors basierte auf drei Geraden, die durch vier Punkte P1 bis P4 definiert werden. Diese Kalibrierung wandelt die dimensionslosen Rohzählwerte in Feuchtwerte um. Während der ersten Versuche wurden Dichte und Schichtdicke des Materials über dem Sensor nicht berücksichtigt. Die ersten Versuchsreihen lieferten entweder eine Standardabweichung größer 15 % oder ein Bestimmtheitsmaß kleiner 0,1 (Tabelle 38). Auch eine Nachkalibrierung brachte keine Verbesserung der Ergebnisse.

Bereits nach dem ersten Jahr war zu erkennen, daß das System Feuchte erfassen konnte. Unklar waren jedoch die Einflußfaktoren, die sich auf die Meßgenauigkeit auswirkten.

Nach Rücksprache mit dem Sensorhersteller liefen im darauffolgenden Jahr Versuche unter Berücksichtigung von Schichtdicke und Materialdichte (Tabelle 39).

Um die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse sicherzustellen, wurde der Versuch Mais 4 durchgeführt, bei dem alle dreißig Proben einen Feuchtegehalt zwischen 70,3 % und 73,2 % besaßen. Bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,064 ist eine Regression nicht sinnvoll. Somit erfolgte zu diesem Versuch keine Neukalibrierung. Auch eine Trennung der Versuche in Schichtdicke 30 mm und 50 mm brachte keine besseren Ergebnisse. Eine Erklärung für die weite Streuung war nicht möglich.

Mais 5 beinhaltete den Versuch, eine Kalibrierung für den Litronic FMS Sensor bei konstanter Schichtdicke von 30 mm und konstanter Dichte von  $0,3 \text{ kg/dm}^3$  zu entwickeln. Der Vergleich zwischen den Rohwerten und den Ergebnissen der Trockenschränkuntersuchungen zeigte deutlich, daß eine Kalibrierung basierend auf zwei Geraden notwendig war (Abbildung 46). Diese Darstellung



zeigte aber auch, daß der Einsatz von zwei Geraden nicht optimal ist. Der Versuch über eine logarithmische Funktion zu kalibrieren, zeigte eine weitere Verbesserung des Bestimmtheitsmaßes (Anhang, Abbildung 65).

Nachdem das Litronic FMS System die Eingabe logarithmischer Kalibrierfunktionen nicht zuläßt, mußte die auf Geraden basierende Lösung verwendet werden. Mit dieser Neukalibrierung lag die Trennung zwischen Niedrigfeuchte und Hochfeuchte bei einem Rohzählwert von 526, was einer Feuchte von 55,1 % entsprach. Die Trennung bei 55 % Feuchte bestätigte die theoretische Überlegung zur Dichtezunahme im Erntegut und deren Kompensierung über zwei Geraden (Abbildung 31).

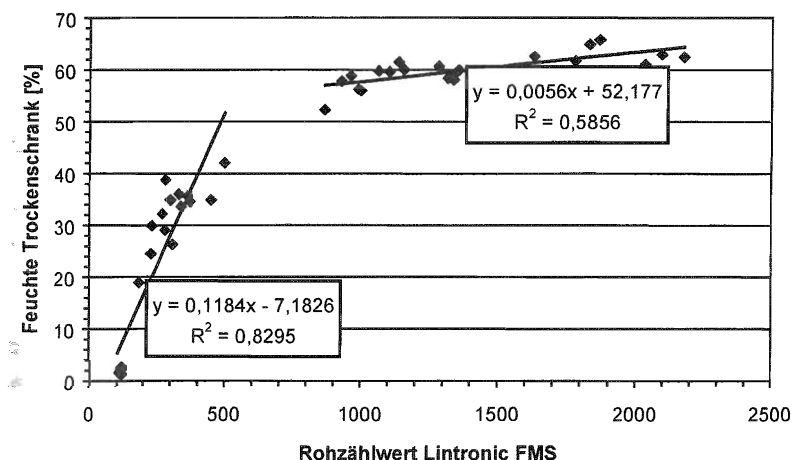


Abbildung 46: Rohzählwerte Litronic FMS verglichen mit Trockenschrankwerten (n = 42).

Mit dieser Neukalibrierung verbesserte sich das Bestimmtheitsmaß von 0,736 auf 0,955 (Abbildung 47). Zudem war deutlich zu erkennen, daß sich alle Feuchtwerte nahe der Ideallinie befanden.

Die Standardabweichung war mit 103,5 % weiterhin sehr hoch. Der Grund dafür lag darin, daß die relative Abweichung zwischen Meß- und Referenzwert bei einem Wassergehalt kleiner als 10 % sehr groß war. Wurde dieser Bereich

ausgeklammert, betrug die Standardabweichung 3,37 % für  $\varphi > 50$  % und 19,98 % für  $10 \% < \varphi < 50$  %.

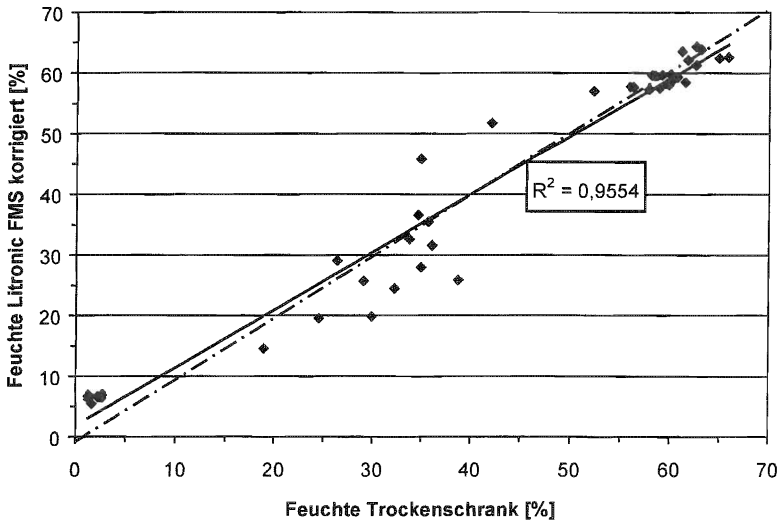


Abbildung 47: Ergebnisse Litronic FMS nach Neukalibrierung mit zwei Geraden.

Aufgrund des verfügbaren Probenmaterials wurde für Gras nur eine Kalibrierung im Hochfeuchtebereich erstellt (Gras 1). Die Standardabweichung von 3,18 % lag innerhalb der geforderten Grenzwerte. Um ein besseres Bestimmtheitsmaß zu erhalten, wären mehr Proben notwendig gewesen.

Weiter beeinflussten unterschiedliche Schichtdicken die Meßergebnisse. Die Versuchsreihe Mais 6 bildet die Basis für eine Analyse dieses Einflußfaktors. Bei einer konstanten Dichte von  $0,3 \text{ kg/dm}^3$  wurde in einem eingeschränkten Feuchtebereich von nur 3,3 % versucht, den Zusammenhang zwischen Abweichung des Meßwertes und Schichtdicken von 10 mm bis 40 mm zu erfassen und mittels einer Korrekturkurve zu kompensieren.

Nach mehreren Ansätzen ergab folgende Gesamtfuchteberechnung mit einem potentiellen Korrekturanteil die besten Ergebnisse, wobei  $\varphi$  die korrigierte Feuchte basierend auf dem Ursprungswert  $\varphi_0$  war:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot 5,3508 \cdot L^{-0,497} \quad (14)$$

Mit einer Standardabweichung von 10,1 % und einem Bestimmtheitsmaß von 0,023 zeigten die Ergebnisse, daß eine Korrektur so nicht möglich war.

Tabelle 39 im Anhang enthält alle Versuche und deren Ergebnisse im Überblick.

Der abschließende Versuch, einen Zusammenhang zwischen Feuchte, Dichte und Schichtdicke zu erstellen, schlug fehl. Basierend auf 180 Proben sollte dieser Zusammenhang ermittelt werden, um darüber eine Korrektorebene zu bestimmen. Wie in Abbildung 48 zu sehen, ließ sich kein eindeutiger Zusammenhang ermitteln. Ausgehend von gleicher Feuchte in den Proben sollte theoretisch die angezeigte Feuchte mit zunehmender Dichte steigen. Ähnliches sollte für zunehmende Schichthöhe bis zu einem bestimmten Level zutreffen.

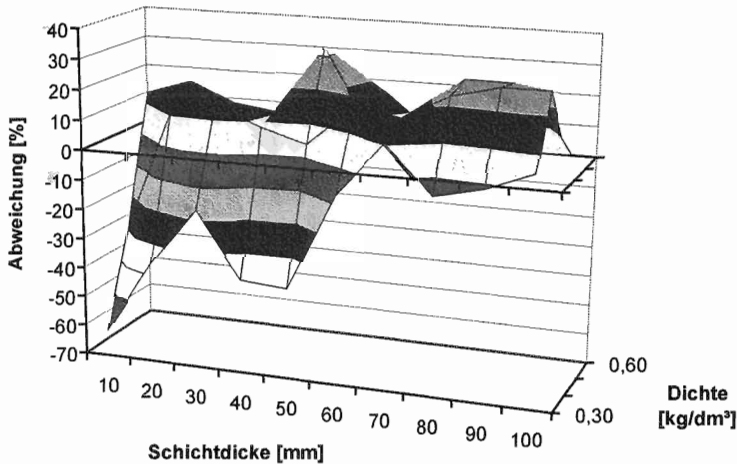


Abbildung 48: Abweichung des Litronic FMS Feuchtemeßsystems in Abhängigkeit von Dichte und Schichtdicke ( $n = 180$ ).

Die Form dieser Fläche ließ keinen mathematisch abbildbaren Trend erkennen, so daß keine weiteren Versuche einer Schichtdicken- und Dichtekorrektur unternommen wurden.

## 5.2 Ergebnisse der Feldversuche

Im Rahmen von Feldversuchen waren die im Labor entwickelten Kalibrierungen zu prüfen und die Genauigkeit der Einzelsysteme sowie die notwendige Anzahl unterschiedlicher Kalibrierungen für unterschiedliche Materialien zu ermitteln.

Da die Genauigkeit der Gesamtfeuchteermittlung unmittelbar mit der Genauigkeit der Durchsatzermittlung zusammenhängt (Kapitel 4.7.2), wurde diese im Rahmen weniger Versuche mit untersucht. Zudem erfolgte ein Vergleich unterschiedlicher Probenahmeverfahren. Zum Erstellen stabiler Kalibrierungen war eine repräsentative Probenahme notwendig.

### 5.2.1 Genauigkeitsuntersuchung der Durchsatzermittlung mit dem radiometrischen Meßsystem

Das von AUERNHAMMER et al. 1995 [4] beschriebene radiometrische System zur Durchsatzermittlung basierte auf einem  $\gamma$ -Strahler mit Detektor zur Flächengewichtsermittlung und einem Radarsensor zur Erfassung der Materialgeschwindigkeit (Abbildung 49).

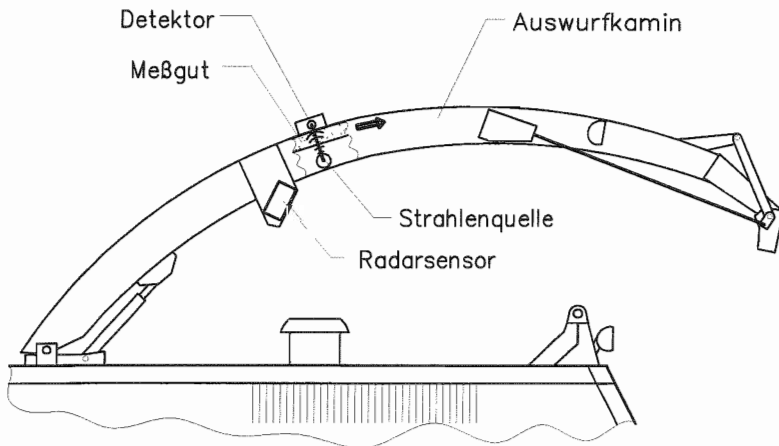


Abbildung 49: Aufbau des radiometrischen Durchflußmeßsystems.

Der aktuelle Durchsatz in der Maschine errechnete sich nach folgender Formel:

$$\text{Durchsatz [t/h]} = (1000 - 10 \cdot K_2 \cdot \log \frac{C}{C_0}) \cdot K_1 \cdot \log \frac{C}{C_0} \cdot \frac{v_M}{10^5} \quad (15)$$

(mit  $K_1$ ,  $K_2$  = materialabhängige Konstanten [-],  $C$  = Zählrate [Hz],  $C_0$  = Leerlaufzählrate [Hz],  $v_M$  = Materialgeschwindigkeit [Hz])

Durch Integration des Durchsatzes über die Zeit ergab sich die Gesamtmasse, die dann mit dem Referenzgewicht der Fuhrwerkswaage verglichen wurde.

Die Untersuchung der Genauigkeit für Anhängerladungen aus den KWS-Streifentests<sup>10)</sup> zeigte eine Genauigkeit von  $\pm 3$  % bei Silomais (Abbildung 50) und von  $\pm 6$  % für Gras. Dagegen konnte bei Silomais-Kleinparzellen mit einer Länge von 20 bis 30 Metern nur eine Genauigkeit von  $\pm 12,1$  % erzielt werden (Abbildung 51). Dies hatte seine Ursache unter anderem in den geringen Durchsätzen und den geringen Integrationszeiten für Ladungen unter einer Tonne Gesamtgewicht.

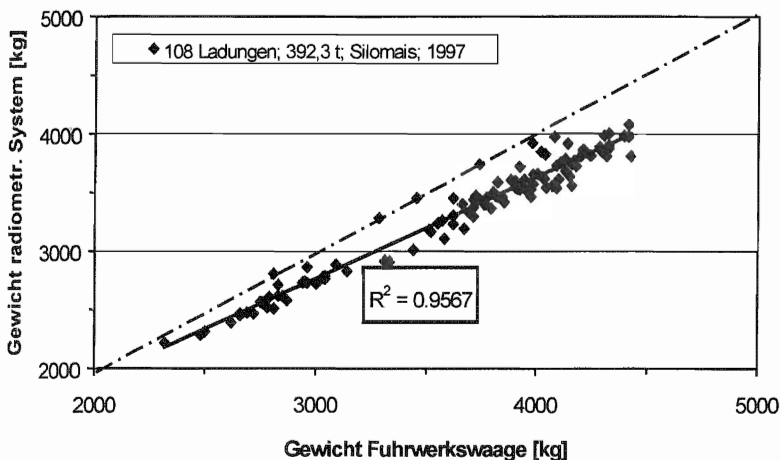


Abbildung 50: Ergebnisse des radiometrischen Systems aus Streifentests.

<sup>10)</sup> Bei einem Streifenstest werden über die gesamte Feldbreite unterschiedliche Maissorten angebaut. Dabei sind alle Streifen (=Sorte) gleich breit. Die einzelnen Sorten werden separat beerntet, um die Erträge vergleichen zu können.

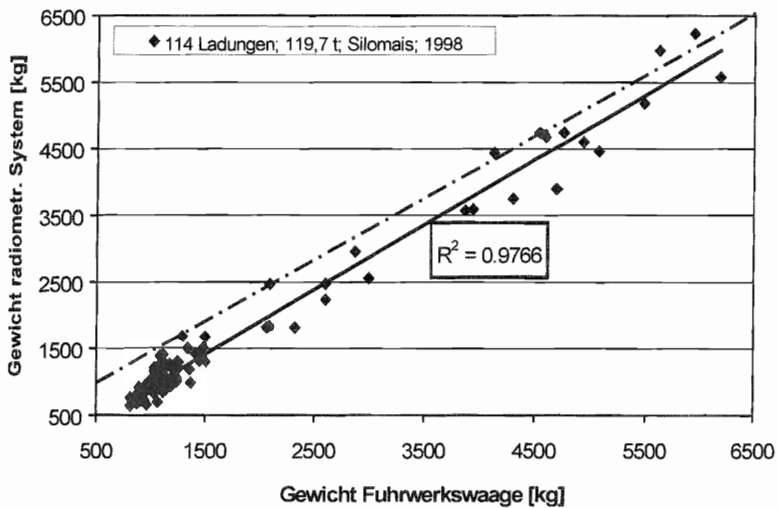


Abbildung 51: Ergebnisse des radiometrischen Systems aus Parzellenversuch.

Selbstfahrende Feldhäcksler kommen in der Regel nicht zur Kleinparzellen-ernte zum Einsatz. Somit wird für die weitere Berechnung der Gesamtfeuchte eine Genauigkeit von  $\pm 3\%$  für die Durchsatzermittlung angenommen. Im Rahmen der Versuche zeigte sich zudem, daß das radiometrische Meßsystem bei nassem Material – verursacht durch Regen während der Erntearbeiten – keine brauchbaren Ergebnisse lieferte. Aufgrund dieser Erkenntnis erfuhren bei Regen geerntete Versuche eine gesonderte Behandlung und gingen nicht in die Gesamtauswertungen ein.

### 5.2.2 Vergleich der Probenahmeverfahren

Um die Repräsentativität der Probenahme mit Hilfe des gekrümmten Rohres zu untersuchen, wurde 1998 während der Silomaisерnte ein Vergleich zwischen den Ergebnissen der Probenahme aus dem Auswurfkrümmеr und der Probenahme aus dem Anhänger angestellt.

Im Rahmen von zwei Streifenversuchen mit insgesamt 82 Proben wurde deutlich, daß die Analyse der aus dem Auswurfkrümmеr gezogenen Proben immer ungefähr 3 % Feuchte weniger ergab als die der Proben aus dem Anhänger (Tabelle 18), was in Abbildung 52 deutlich zu erkennen ist.

*Tabelle 18: Ergebnisse des Vergleiches der Probenahmeverfahren.*

Datum	Betrieb	Anzahl Proben	Mittlere Abweichung
06.10.98	Stauderer / Großaitingen	33	-2,87 %
09.10.98	Dziumbła / Rammertshofen	49	-3,53 %

Die Ursache dafür liegt in der Materialentmischung an dieser Entnahmestelle. Aufgrund der Zentrifugalkraft läuft das schwerere und zugleich feuchtere Material an der Außenseite des Radius des Aufwurfkamins, die leichteren Teile auf der Innenseite. Für die Probenahme wird mit einem kreisförmigen Querschnitt ein Teil aus dem Materialstrom entnommen. Dieser Querschnitt und die Tatsache, daß wegen der Verstopfungsgefahr in der Maschine das Rohr nicht bis zum Verschleißblech in den Materialfluß gehalten werden darf, sind die Ursachen für den höheren Anteil an trockenerem Material in der Probenmenge (Abbildung 53).

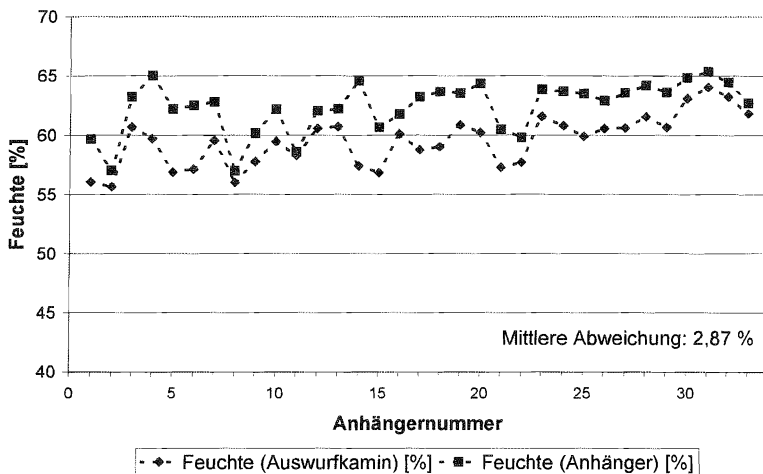


Abbildung 52: Vergleich der Feuchtwerte bei Probenahme aus Auswurfkamin und Anhänger (06.10.98, Maissilage, Großaitingen).

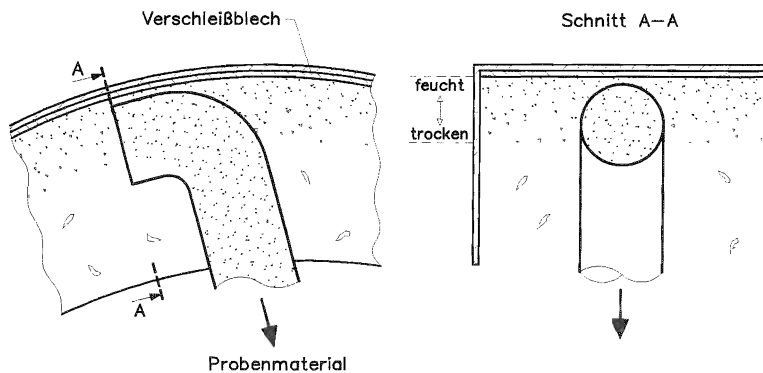


Abbildung 53: Materialverteilung im Auswurfkamin.



Abhilfe könnte ein rechteckiger Entnahmequerschnitt oder eine Klappe im Auswurfkamin schaffen. Bei jeder Entnahme von Material aus dem Auswurfkamin bleibt aber die Gefahr einer Verstopfung der Maschine erhalten.

Im Rahmen der Untersuchungen werden ab 1998 alle Proben nach der in 4.5.4 beschriebenen Methode vom Anhänger entnommen.

### 5.2.3 Ergebnisse der NIR- Feuchtemeßsysteme

Für die Untersuchungen im Feld standen zwei NIR Feuchtemeßsysteme zur Verfügung. Das Filtrerradsystem Mesa MM55, mit dem die Erfassung von zwei Parametern möglich war, und das Diodenarraysystem Perten DA7000, das die Erfassung von bis zu 10 Parametern erlaubte.

#### 5.2.3.1 MESA MM55

Im ersten Ansatz 1997 war der Meßkopf des MM55 so montiert, daß die Optik von unten in den Auswurfkamin „blickte“ (Abbildung 54). Diese Montageposition war leicht realisierbar, da keine gravierenden Änderungen an der Maschine vorgenommen werden mußten.

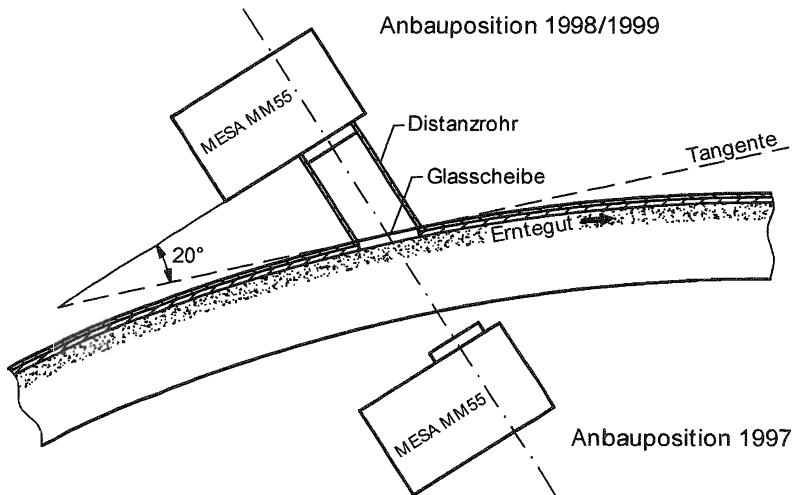


Abbildung 54: Anbaupositionen des MESA MM55 Meßkopfes.

Die Probenahme erfolgt 1997 mit dem in Abbildung 53 beschriebenen Verfahren. Der Feuchtwert errechnete sich als gewichteter Mittelwert über die Einzelmeßwerte, die aufgezeichnet wurden, solange der Tastschalter betätigt war. Dies bedeutet, daß die Ergebnisse von ungefähr fünf Sekunden gemittelt und dann mit dem Referenzwert des Trockenschrankuntersuchung verglichen werden.

Die Ergebnisse aus dieser Versuchsanordnung zeigten deutlich, daß diese Montageposition und die Probenahme Fehlerquellen mit sich brachten. Bei insgesamt fünf Versuchsflächen und ungefähr vierhundert Proben traten immer wieder die gleichen Probleme auf. Bedingt durch die Anbauposition lagerte sich immer wieder Häckselgut vor der Meßoptik ab, wodurch die Meßwerte zu niedrig wurden (Abbildung 55).

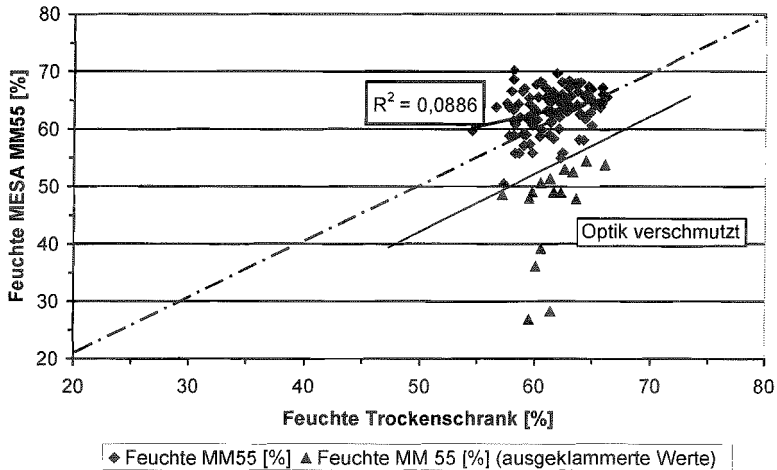


Abbildung 55: Meßwerte MM55 bei sauberer und verschmutzter Optik.

Waren alle Meßwerte aus der Analyse ausgenommen, die offensichtlich bei verschmutzter Optik aufgezeichnet sind, ergab sich eine Standardabweichung von 4,03 % bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,089. Durch die Materialentmischung im Auswurfkamin scannte der Meßkopf bei dieser Montageposition immer die trockensten Anteile im Materialstrom, die nur einen sehr geringen Anteil der Gesamtmasse repräsentierten. Zudem war bei diesem Meßaufbau der Einfluß von Fremdlicht nicht ausgeschlossen.

Da es in der Praxis nicht akzeptabel ist, die Meßoptik nach jedem Anhänger zu reinigen, mußte nach Reinigungsmöglichkeiten für die Optik gesucht werden. Zudem sollte ein möglichst repräsentativer Anteil des Materialstroms vom Sensor erfaßt werden, der beispielsweise auf der Oberseite des Materialstroms zu finden wäre. Für die Reinigung kamen eine Reinigung mittels Druckluft oder eine Selbstreinigung des Meßfensters durch den Materialstrom in Betracht.

Nach verschiedenen Überlegungen fiel 1998 die Entscheidung zugunsten eines Meßaufbaus, bei dem der Meßkopf durch eine Fensterglasscheibe von oben in den Materialstrom „blickte“ (Abbildung 54). Das Distanzrohr diente sowohl der Befestigung als auch der Abschirmung gegen Fremdlicht und Schmutz. Zudem sollte 1998 ein größerer Feuchtebereich erfaßt werden, was durch eine geeignete Auswahl der Versuchsstandorte und Zeiträume möglich war. Für den Hochfeuchtebereich wurde der Algorithmus 0 auf Kanal A verwendet. Nachdem die Probenahme nun vom Anhänger erfolgte, wurde ein gewichteter Mittelwert gemäß der in Kapitel 4.7.2 vorgestellten Methode errechnet. Die Mittelung erfolgte für eine gesamte Ladung, was einem Zeitraum von 60 s bis 300 s entsprach. Mit diesem Setup wurden die in Tabelle 19 und Tabelle 20 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

Tabelle 19: Ergebnisse der Praxisversuche 1 mit dem MESA MM55 (1998).

Versuchsreihe	Dürnast	Holzheim (KWS)	Großaitingen (KWS)	Rammerts- hofen (KWS)
Datum	25.09.98	29.09.98	06.10.98	09.10.98
Anzahl Proben	26	41	34	49
Feuchte min. [%]	60,4	43,1	57,0	55,8
Feuchte max. [%]	70,2	61,5	65,4	65,0
Feuchtebereich [%]	9,8	18,4	8,4	9,2
<b>Kalibriereinstellungen</b>				
Algorithmus	0	0	0	0
Span	24,56	24,56	24,56	24,56
Zero	75	75	75	75
Zero Range	0	0	0	0
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	-17,7	-33,9	-31,29	- 39,4
Standardabweichung [%]	4,56	6,77	6,98	6,63
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,432	0,654	0,379	0,308
<b>Kalibriereinstellungen neu</b>				
Algorithmus	0	0	0	0
Span	14,33	14,59	10,37	10,87
Zero	3406	9945	5188	1307
Zero Range	6	5	11	11
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	0,0	0,1	0,1	0,1
Standardabweichung [%]	2,82	3,40	3,04	3,20
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,432	0,654	0,379	0,308

Die drei Sortenversuche der Kleinwanzlebener Saatzucht (KWS) ließen die Aussage zu, daß die Meßergebnisse dieses NIR Filtrerradsensors nicht sortenabhängig sind (siehe Anhang 10.2.6). Der Versuch in Dürnast fiel durch eine mit -17,7 % deutlich geringere mittlere Abweichung als die anderen Versuche auf. Eine Erklärung dafür war im Nachhinein nicht zu finden.

Tabelle 20: Ergebnisse der Praxisversuche 2 mit dem MESA MM55 (1998).

Versuchsreihe	Langenbach (Parzellen)	Neuhausen (Parzellen)	Gesamtdaten Mais Erntejahr 1998
Datum	24.09.98	10.10.98	1998
Anzahl Proben	90	76	316
Feuchte min. [%]	61,5	57,4	43,1
Feuchte max. [%]	73,4	68,6	73,4
Feuchtebereich [%]	11,9	11,2	30,3
<b>Kalibriereinstellungen</b>			
Algorithmus	0	0	0
Span	24,56	24,56	24,56
Zero	75	75	75
Zero Range	0	0	0
<b>Ergebnisse</b>			
mittlere Abweichung [%]	-38,4	-45,8	37,4
Standardabweichung [%]	5,07	6,49	10,20
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,031	0,190	0,254
<b>Kalibriereinstellungen neu</b>			
Algorithmus	0	0	0
Span	17,23	16,52	16,81
Zero	751	5467	7700
Zero Range	6	6	5
<b>Ergebnisse</b>			
mittlere Abweichung [%]	0,1	0,1	0,4
Standardabweichung [%]	4,47	5,12	7,88
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,031	0,190	0,254

Die Parzellenversuche liefen in Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Gleichstandsart bei Silomais von PETERREINS [35], wobei die Parzellenlänge jeweils 20 m bis 30 m betrug. Diese kurzen Häcksellängen ließen nur kurzzeitig einen vollen Materialstrom zu, wodurch die Grenzwerteinflüsse beim Ein- und Ausfahren in die Parzelle zunahm. Daher resultierten auch die vergleichsweise schlechten Meßergebnisse.

Nach einer Kalibrierung über alle 316 Ladungen wurde ein Korrekturfaktor für die jeweilige Probe ermittelt. Aus Abbildung 56 wird ersichtlich, daß das Ergebnis dieses Meßsystems leicht vom Durchsatz abhing. Wurde diese Korrektur durchgeführt, verbesserte sich die Standardabweichung auf 6,77 % und das Bestimmtheitsmaß auf 0,399. Bei Durchsätzen von mehr als 30 t/h schien im-

mer genug Material im Auswurfkamin vorhanden zu sein, um eine NIR Messung durchführen zu können.

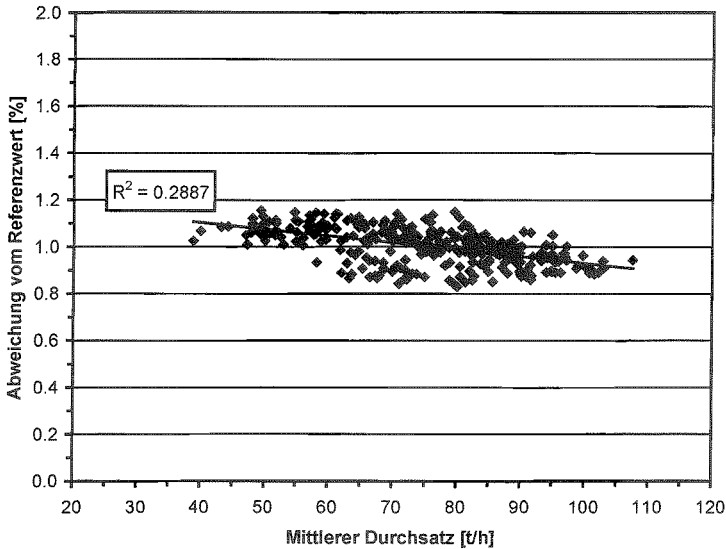


Abbildung 56: Zusammenhang zwischen Durchsatz und Korrekturfaktor (1998, Maissilage, 316 Proben, nach Neukalibrierung).

Basierend auf diesen Ergebnissen entwickelte die Firma MESA den MoistuRite Sensor, der aber während der gesamten Ernte 1999 nicht zum Laufen gebracht werden konnte. Letztendlich kam wieder das MM55 Meßsystem mit einer verbesserten Kalibrierung zum Einsatz. Die Ergebnisse von 248 Proben aus einem Feuchtebereich von 48 % bis 73 % erfüllten mit einer Standardabweichung von 4,40 % die Anforderungen an ein Meßsystem, was in Abbildung 57 deutlich zu erkennen ist.

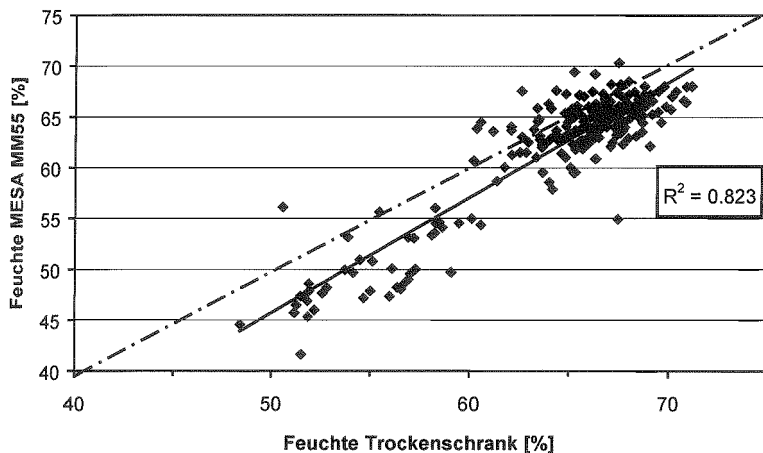


Abbildung 57: Ergebnisse der Praxisversuche 1999 mit dem MESA MM55  
--(n = 248).

### 5.2.3.2 Perten DA7000

Zum letzten Gleichstandsversuch der Maisernte 1998 kam das Perten DA7000 flexi.dual SN 1012 direct View zum Einsatz. Dieses Diodenarray System war für den Laborbetrieb konzipiert. Während des Feldeinsatzes schützte eine Abdeckhaube das Meßsystem gegen Verschmutzung und Fremdlichteinfall. Die Aufzeichnung wurde in jeder 25 m Parzelle von Hand für fünf Sekunden gestartet. Aus den so gewonnenen Rohspektren und den Referenzwerten aus der Laboranalyse wurden von einem Mitarbeiter der Firma Perten mit Hilfe der Software Galactic Grams32/PLS IQ Software quantitative PLS-1 Kalibrationen für insgesamt acht Parameter berechnet.

Diese Analyse der 82 Proben ergab für die Ergebnisse aus einem Feuchtebereich von 57,4 % bis 68,6 % ein Bestimmtheitsmaß von 0,774 und einem Standardfehler von 1,39 % absolute Feuchte (Abbildung 58). Dabei gingen 13 Faktoren in die Kalibrierung ein.

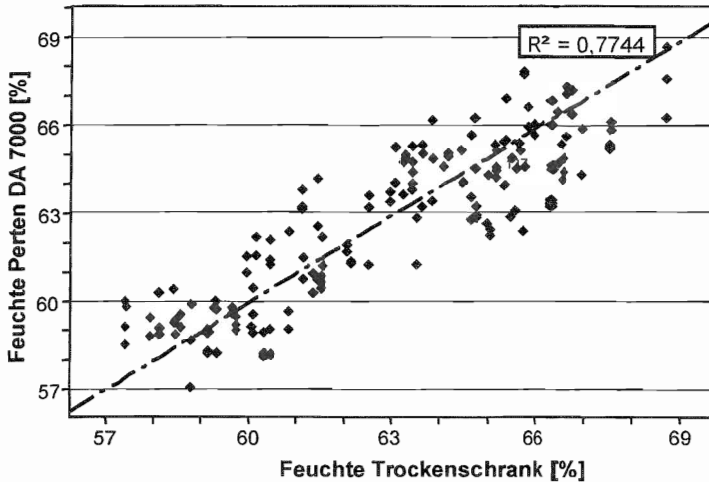


Abbildung 58: Ergebnisse der Feuchtemessung mit dem Perten DA 7000  
( $n = 82$ ).

Da alle Proben auch auf ihre Inhaltsstoffe untersucht wurden, ergab sich die Möglichkeit, auch für diese Kalibrierungen zu erstellen. Die Ergebnisse zeigten, daß das DA7000 das Potential hat, auch diese zu ermitteln (Tabelle 21).

Tabelle 21: Ergebnisse der Inhaltsstoffbestimmung mit Perten DA7000.

Parameter	Bereich [%]	R <sup>2</sup>	SECV [%]	Faktoren
Wasser	57,4 – 68,6	0,774	1,39	13
Stärke	28,0 – 41,2	0,608	1,62	13
Elos	63,8 – 75,9	0,449	1,69	16
Rfa	12,4 – 21,4	0,423	1,39	13
Rp	6,5 – 8,9	0,706	0,28	12
Asche	3,5 – 4,8	0,303	0,25	11
ME [MJ/kg]	10,0 – 11,5	0,348	0,23	9
NEL [MJ/kg]	5,9 – 7,0	0,360	0,17	9

In der Maiserntesaison 1999 fanden weitere Versuche mit diesem NIR Meßsystem statt, deren Ergebnisse aufgrund einer falschen Kalibriereinstellung nicht verwertet werden konnten.



## 5.2.4 Ergebnisse der kapazitiven Feuchtemeßsysteme

Aufgrund der Laborergebnisse wurde in den Praxisversuchen zunächst das kapazitive Feuchtemeßsystem Litronic FMS der Firma Liebherr eingesetzt. Bei konstanten Arbeitsbedingungen des Feldhäckslers war zu vermuten, daß damit gute Meßergebnisse erzielt werden könnten. Nachdem sich dies nicht bewahrheitete, kam die FSV 2 Sonde der Firma Arnold zum Einsatz, deren Meßwerte weniger abhängig von Materialdichte und Schichtdicke sein sollten.

Die Gewinnung der Meßwerte erfolgte auch für die kapazitiven Meßverfahren bei Probenahme mittels Rohr im Jahre 1997 durch Mittelwertbildung über einen Zeitraum von ungefähr fünf Sekunden, wenn der Tastschalter betätigt war. Bei der Entnahme der Proben aus dem Anhänger (1998 und 1999) wurde die Gesamtfeuchte gemäß Kapitel 4.7.2 berechnet. Anschließend fand der Vergleich dieser Meßwerte mit den Referenzwerten der Trockenschrankanalyse statt. Dieses Vorgehen war für alle Systeme gleich.

### 5.2.4.1 *ARNOLD FSV*

Die Firma Arnold modifizierte eine Standard FSV Sonde derart, daß die Eindringtiefe auf ungefähr 20 mm reduziert wurde. In der Ernte 1999 erfolgte der Test, inwieweit die Probleme der kapazitiven Meßsysteme hinsichtlich Durchsatz- beziehungsweise Schichtdickenabhängigkeit gelöst waren. Zusätzlich sollte an einer Kalibrierung für einen möglichst weiten Feuchtebereich gearbeitet werden. Das Ergebnis der 264 Wagenladungen zeigte mit einer Standardabweichung von 20,52 % bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,272, daß die Anforderungen an die Meßgenauigkeit bei weitem nicht eingehalten wurden.

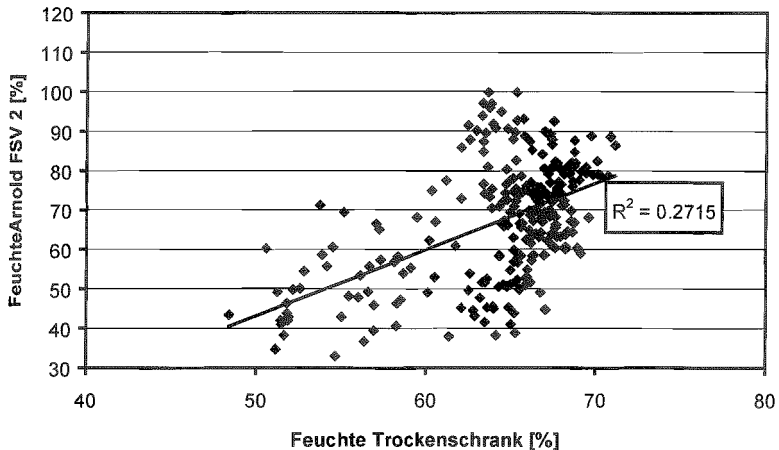


Abbildung 59: Ergebnisse der Feldversuche 1999 mit dem Arnold FSV 2  
( $n = 264$ ).

Während dieser Versuche mußte festgestellt werden, daß zusätzlich zu den bekannten Einflußfaktoren auf die Meßergebnisse die Neigung des Auswurfkamins eine entscheidende Rolle spielte. Diese wurde anhand der Länge des Hubzylinders von Hand gemessen. Je niedriger der Auswurfkamin stand, desto höher wurde der Meßwert (Abbildung 60). Den gleichen Einfluß hatte ein höherer Durchsatz. Zudem bestätigte sich der starke Einfluß des Durchsatzes beziehungsweise der Schichtdicke auf die Meßergebnisse der kapazitiven Meßsysteme. Dies liegt darin begründet, daß bei geringen Durchsätzen die Mindestschichtdicke über dem Sensor nicht erreicht wird, und somit ein Anteil an Luft mit in die Messung eingeht.

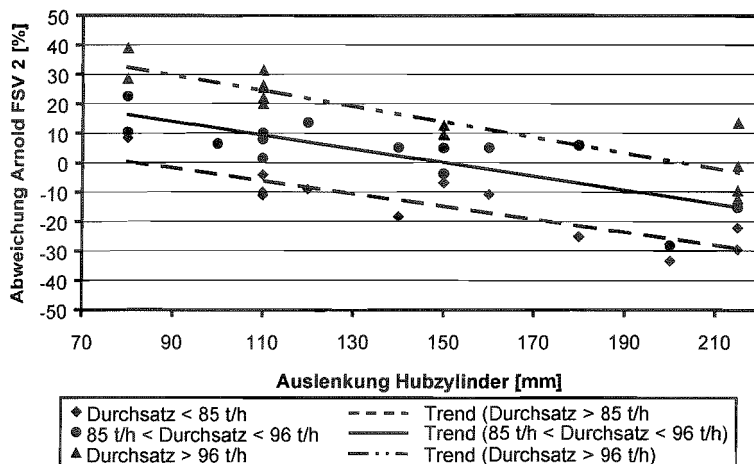


Abbildung 60: Einfluß der Stellung des Auswurfkrümmers auf das Meßergebnis des Arnold FSV 2.

Somit beeinflussen Schichtdicke, Dichte und Position des Auswurfkrümmers die Meßergebnisse. Eine Korrektur dieser drei Parameter, die teilweise voneinander abhängig sind, ist nicht möglich, da diese nicht oder nur mit weiteren Fehlern behaftet gemessen werden können.

#### 5.2.4.2 Liebherr Litronic FMS

Die Meßsonde des Liebherr Feuchtemeßsystems war 1997 und 1998 an der gleichen Position im Auswurfkamin angebracht (Abbildung 21).

Die Ergebnisse der Erntesaison 1997 waren mit einer Standardabweichung von 15 % bis 30 % und einem Bestimmtheitsmaß von weniger als 0,3 nicht zufriedenstellend. 1998 wurde mit einer verbesserten Kalibrierung und unter Berücksichtigung des Durchsatzes versucht, weitere Erkenntnisse zu gewinnen.

Tabelle 22 und Tabelle 23 zeigen die Ergebnisse der Feldversuche 1998. Dabei sind der Bereich der Durchsätze und die Standardabweichung der mittleren Durchsätze berücksichtigt.

Tabelle 22: Ergebnisse der Praxisversuche 1 mit dem Litronic FMS (1998).

Versuchsreihe	Dürmast	Holzheim (KWS)	Großaitingen (KWS)	Rammerts- hofen (KWS)
Datum	25.09.98	29.09.98	06.10.98	09.10.98
Anzahl Proben	26	41	34	49
Feuchte min. [%]	60,4	43,1	57,0	55,8
Feuchte max. [%]	70,2	61,5	65,4	65,0
Feuchtebereich [%]	9,8	18,4	8,4	9,2
Durchsatzbereich [t/h]	72,0 – 101,1	58,2 – 88,0	68,7 – 107,5	64,5 – 97,1
Mittlerer Durchsatz [t/h]	90,2	72,5	91,3	85,1
Standardabweichung [t/h]	6,7	6,9	12,8	5,8
<b>Kalibriereinstellungen</b>				
P1	100 / 0	100 / 0	100 / 0	100 / 0
P2	1000 / 1680	1000 / 1680	1000 / 1680	1000 / 1680
P3	3000 / 5400	3000 / 5400	3000 / 5400	3000 / 5400
P4	5000 / 9000	5000 / 9000	5000 / 9000	5000 / 9000
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	-58,0	-60,2	-59,9	-61,0
Standardabweichung [%]	5,51	6,78	6,88	6,51
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,263	0,614	0,295	0,179
<b>Kalibriereinstellungen neu</b>				
Kalibrierformel	$\varphi = 2,40 \cdot \varphi_0$	$\varphi = 2,50 \cdot \varphi_0$	$\varphi = 2,50 \cdot \varphi_0$	$\varphi = 2,56 \cdot \varphi_0$
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	0,8	-0,6	-0,5	-0,2
Standardabweichung [%]	13,23	17,18	17,47	16,66
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,263	0,614	0,295	0,179

Bei hohen und relativ konstanten Durchsätzen wurden die besten Genauigkeiten erreicht, die jedoch alle weit entfernt von den Werten der Anforderungsliste lagen.

Tabelle 23: Ergebnisse der Praxisversuche 2 mit dem Litronic FMS (1998).

Versuchsreihe	Langenbach (Parzellen)	Neuhausen (Parzellen)		Gesamtdaten Mais Erntejahr 1998
Datum	24.09.98	10.10.98		1998
Anzahl Proben	90	76		316
Feuchte min. [%]	61,5	57,4		43,1
Feuchte max. [%]	73,4	68,6		73,4
Feuchtebereich [%]	11,9	11,2		30,3
Durchsatzbereich [t/h]	38,8 – 99,7	40,0 – 96,7		38,8 – 107,5
Mittlerer Durchsatz [t/h]	70,2	69,4		75,3
Standardabweichung [t/h]	14,5	12,1		14,2
<b>Kalibriereinstellungen</b>				
P1	100 / 0	100 / 0		100 / 0
P2	1000 / 1680	1000 / 1680		1000 / 1680
P3	3000 / 5400	3000 / 5400		3000 / 5400
P4	5000 / 9000	5000 / 9000		5000 / 9000
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	-66,1	-73,3		-65,0
Standardabweichung [%]	14,13	9,30		10,95
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,040	0,035		0,035
<b>Kalibriereinstellungen neu</b>				
Kalibrierformel	$\varphi = 2,85 \cdot \varphi_0$	$\varphi = 3,75 \cdot \varphi_0$		$\varphi = 2,85 \cdot \varphi_0$
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	0,0	0,0		-0,6
Standardabweichung [%]	40,27	34,87		30,84
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,040	0,035		0,035

Basierend auf 316 Meßwerten wurde ein Zusammenhang zwischen Meßfehler und Durchsatz erkennbar (Abbildung 61). Zugleich ließ die breitere Streuung der Faktoren bei Durchsätzen kleiner als 70 t/h den Schluß zu, daß für eine Feuchtemessung mit dem Litronic FMS im Auswurfkamin dieses Feldhäcksler-typs ein Massestrom über dieser Grenze notwendig wäre.

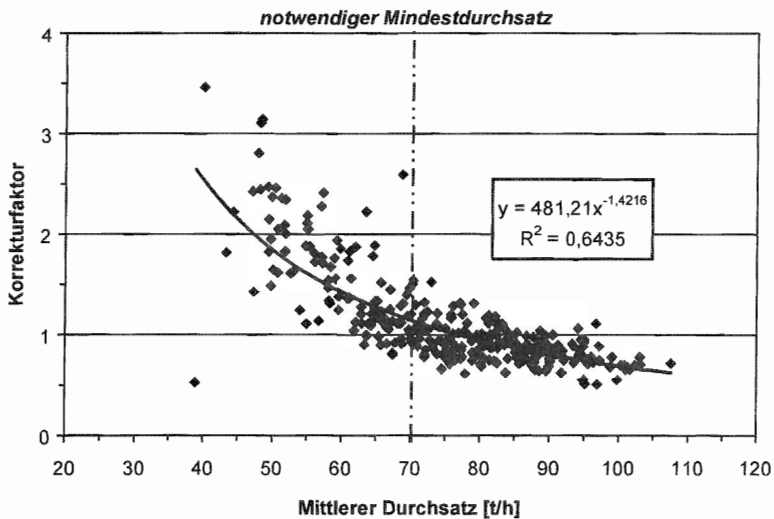


Abbildung 61: Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und Durchsatz (1998, Maissilage, 316 Proben, Litronic FMS).

Die damit durchgeführte Massenstrom- oder Schichtdickenkorrektur führt zu einer Standardabweichung von 19,25 % und einem Bestimmtheitsmaß von 0,074 – einer deutlichen Verbesserung, aber immer noch nicht gut genug.

Da ein Materialstrom, der konstant über 70 t/h liegt, in der Praxis nicht immer erreicht werden kann, müssen Änderungen des Sensors vorgenommen werden, um den Einsatzbereich zu erweitern. Nach Rücksprache mit mehreren Sensorherstellern, wäre der erste Ansatz, die Eindringtiefe auf unter 20 mm zu reduzieren, der zweite wäre eine geänderte Kalibrierfunktion. Diese Anforderungen konnten von der Firma Liebherr nicht erfüllt werden, so daß dieses Meßsystem nicht weiter zum Einsatz kam.

Die Ergebnisse des Versuchs, die Ballenfeuchte mit dem Litronic FMS Sensor integriert in die Seitenwand der Presse zu messen, zeigten stark schwankende Werte, deren Zuordnung zu einem Referenzwert nicht möglich war. Der hohe Materialdruck an den Sensor und die Rotation des Ballens führten zu einer starken Erwärmung des Sensors. Für eine Feuchtemessung mit drei Meßköpfen im Zuführkanal zur Ballenkammer fehlte eine ausreichende Materialdichte, um stabile Meßergebnisse erfassen zu können (Abbildung 62). Die Sensoren

eins und zwei zeigen starke Schwankungen in der Feuchte, während der Sensor FMS 3 über die gesamte Zeit einen Wert von ungefähr 3 % anzeigt.

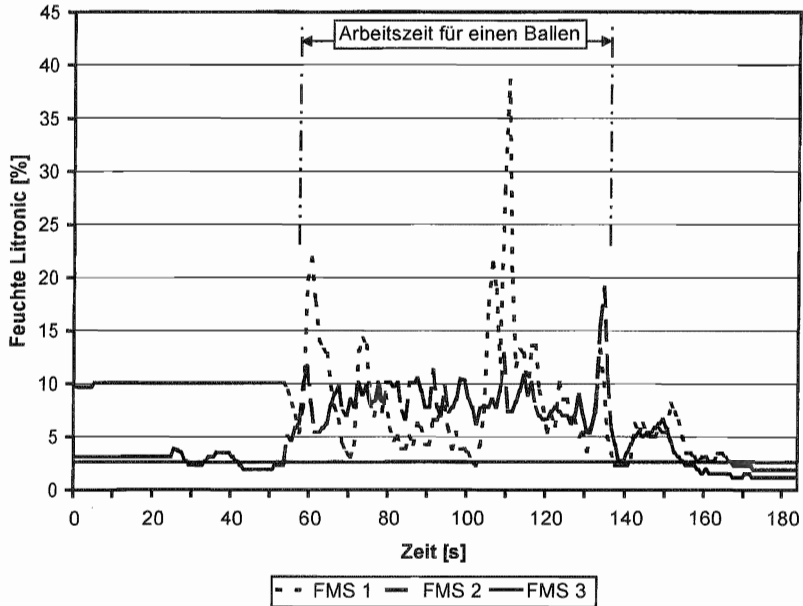


Abbildung 62: Verlauf der Feuchtemesswerte der drei Litronic FMS Feuchtesensoren in der Rundballenpresse für einen Ballen Grassilage (1998).

Daraus wird deutlich, daß eine Feuchtemessung mit diesem Sensoranbau nicht möglich ist. Der Vorteil an dieser Position wäre die leichte Entnahme und Zuordnung von Probenmaterial nach dem Auswerfen des Ballens gewesen (Abbildung 24).





## 6 Diskussion und Schlußfolgerung

Nachdem alle Ergebnisse aufbereitet sind, sollen diese den Anforderungen gegenübergestellt und in die Verfahrenstechnik eingeordnet werden. Dazu ist es notwendig, alle Bestandteile des Projektes „Feuchtemessung in Futtererntemaschinen“ einzeln zu betrachten.

### 6.1 Einordnung der Ergebnisse

Der aufgestellte Projektplan erwies sich während des gesamten Projektes als hilfreicher Leitfaden für alle Arbeiten und ermöglichte eine ständige Kontrolle des Fortschritts der Entwicklung.

Auffallend bei dem Stand des Wissens war, daß nur wenige Informationen über das Material und den Materialfluß vorlagen, woran sich auch im Laufe der Untersuchungen nicht viel änderte. So waren beispielsweise keine Informationen darüber verfügbar, welche Dichte die verschiedenen Erntegüter beim Durchlaufen eines Feldhäckslers besitzen. Ebenso ist die tatsächliche Position und Form des Materialstroms zwischen Messertrommel und Auswurfkamin teilweise unbekannt. Einzig die Laboruntersuchungen ließen Rückschlüsse auf ungefähre Werte zu. So lag die Dichte von Maissilage mit einer Häcksellänge zwischen 4 mm und 8 mm immer zwischen  $0,3 \text{ kg/dm}^3$  und  $0,6 \text{ kg/dm}^3$ . Zudem war es nicht möglich, exakte Aussagen über die tatsächliche Korngröße (Partikelgröße) des jeweiligen Futtererntegutes zu treffen.

Trotz der vagen Informationen über die Materialflußbedingungen bestätigte sich die in Kapitel 4.2 theoretisch durchgeführte Bewertung der Anbaupositionen in beiden Erntemaschinen. Für den Feldhäckslers erwies sich der Bereich 9, das heißt der vordere Teil des Auswurfkamins, als optimal. In allen anderen Bereichen war entweder der benötigte Anbauraum oder die Möglichkeit des gesicherten direkten Materialkontakts nicht gegeben. Dagegen stellten in der Rundballenpresse die wechselnde Materialzuführung auf der gesamten Ballenbreite sowie die mechanischen Rahmenbedingungen große Probleme für die Sensoranbringung dar. Eine Integration in die Seitenwand der Ballenpresse war in der Nähe des Materialeintritts aus Platzgründen nicht realisierbar, was die zeitliche Zuordnung der Meßergebnisse zur Position unmöglich machte. Die

Ballenoberfläche konnte aufgrund der Bänder nicht erreicht werden. Um die Feuchte des neu in die Preßkammer eintretenden Materials zu messen, wären mindestens zwei Sensoren verteilt auf die Ballenbreite notwendig. Alle diese Anforderungen lassen sich ohne umfangreiche konstruktive Änderungen an der Rundballenpresse nicht erfüllen.

Die fehlenden Erfahrungen seitens der Sensorhersteller bezüglich der Feuchtemessung in Futtererntegütern und des mobilen Einsatzes der Systeme auf Erntemaschinen haben deutlich gezeigt, daß eine intensive Zusammenarbeit zwischen allen Projektpartnern vor Ort unabdingbare Voraussetzung für eine solche Entwicklungsarbeit ist.

### **6.1.1 Bewertung der Versuche zur Feuchtemessung im Labor**

Die grundsätzliche Frage, ob die Feuchte in organischen Materialien vom jeweiligen Meßprinzip beziehungsweise Sensor gemessen werden kann, läßt sich in Laboruntersuchungen einfach und zuverlässig klären. Dafür sind Proben der möglichen Erntegüter notwendig, die den gesamten möglichen Feuchtebereich abdecken. Während frisches Erntegut nur zeitlich begrenzt zur Verfügung steht, lassen sich Basistests sehr gut mit Maissilage aus dem Silostock durchführen. Vorteil dabei ist zudem die vergleichsweise homogene Feuchteverteilung im Material. Das Vortrocknen von Silage macht einen weiten Feuchtebereich verfügbar.

Die Geometrie der Sensor – Materialanordnung im Labor sollte möglichst der in den Erntemaschinen gleichen, um dadurch die erstellten Kalibrierungen für Feldeinsätze übertragbar zu machen. So können mit Ausnahme der Geschwindigkeit die praxisrelevanten Parameter wie Erntegut, Schichtdicke, Dichte und Feuchte gezielt variiert werden. Das Einbringen einer bestimmten Menge an Erntegut in Zylinder gewährleistet eine definierte Schichtdicke, aber keine definierte Gleichverteilung des Materials innerhalb dieses Raumes (Dichte). Die unbekannte Korngröße beeinträchtigt folglich vor allem die Genauigkeit der ins Material eindringenden Meßverfahren.

Repräsentative Referenzwerte sind im Labor vergleichsweise einfach zu erzielen, da immer die gesamte Probe bei 105 °C in den Trockenschrank gegeben wird. Verlustfreie Ein- und Rückwaage sowie Trocknung bis zur Gewichtskonstanz bilden die Basis für aussagekräftige Feuchtwerte.

Die stabilsten Kalibrierungen und Meßergebnisse lassen sich durch wiederholtes Messen und mehrmaliges Neuauflegen der Probe sowie anschließende Mittelwertbildung der Einzelwerte erzielen. Dies trifft vor allem für die NIR-Feuchtemeßsysteme zu, die nur die Oberfläche des Erntegutes absammeln. Da in der Praxis jede „Probe“ nur einmal gemessen wird, ist bei den Laborversuchen auf die Wiederholung teilweise bewußt verzichtet worden. Mit fünf Wiederholungen zu jeder Versuchseinstellung sind im Labor genügend Daten vorhanden, um nach Elimination von Ausreißern eine statistische Auswertung vornehmen zu können. Es erwies sich als Vorteil, bei der Erstellung von Kalibrierungen den Feuchtebereich den Gegebenheiten in der Praxis anzupassen (Tabelle 6). Wird der gesamte Feuchtebereich von 8 % bis 90 % in die Kalibrierung einbezogen, entstehen vergleichsweise hohe Abweichungen am oberen und unteren Limit.

Die Ergebnisse der Laborversuche verdeutlichen, daß alle getesteten Meßprinzipien grundsätzlich in der Lage sind, Feuchte in organischen Materialien zu erfassen. Alle getesteten NIR-Feuchtemeßsysteme zeigen sehr gute Ergebnisse, die mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  % deutlich innerhalb der geforderten Mindestgenauigkeit von  $\pm 5$  % lagen. Größere Standardabweichungen treten auf, wenn in Bereichen unter 10 % Feuchte gemessen wurde. So lange eine Mindestbedeckung mit Material von ungefähr 10 mm vorhanden ist, sind die Ergebnisse unabhängig von Schichtdicke und Dichte. Zudem wurde gezeigt, daß die Messung von Inhaltsstoffen im Labor mit NIR-Meßsystemen möglich ist.

Im Gegensatz dazu liegt die Genauigkeit der getesteten kapazitiven Meßsysteme unter idealen Voraussetzungen – konstante Dichte und Schichtdicke – über den gesamten Meßbereich nicht besser als  $\pm 10$  %. Die Einflüsse von Schichtdicke und Dichte können tendenziell aufgezeigt, aber nicht mittels einer Korrekturformel eliminiert werden. Basierend auf den theoretischen Betrachtungen der Dichtezunahme im Material mit der Feuchtezunahme sowie auf den Laborversuchen muß festgehalten werden, daß eine einzige lineare Kalibrierung für den geforderten Feuchtebereich von 8 – 90 % nicht ausreicht.

Die wenigen Ergebnisse der Mikrowellensensoren lassen auf eine ähnliche Meßgenauigkeit und ähnliche Probleme wie bei den kapazitiven Systemen schließen.

Mit diesen Erkenntnissen können die Einflußfaktoren auf das Schema zur Bewertung von Meßergebnissen (Abbildung 29) ergänzt werden. In Abbildung 63 sind die in diesem Kapitel beschriebenen Zusammenhänge systematisch dargestellt.

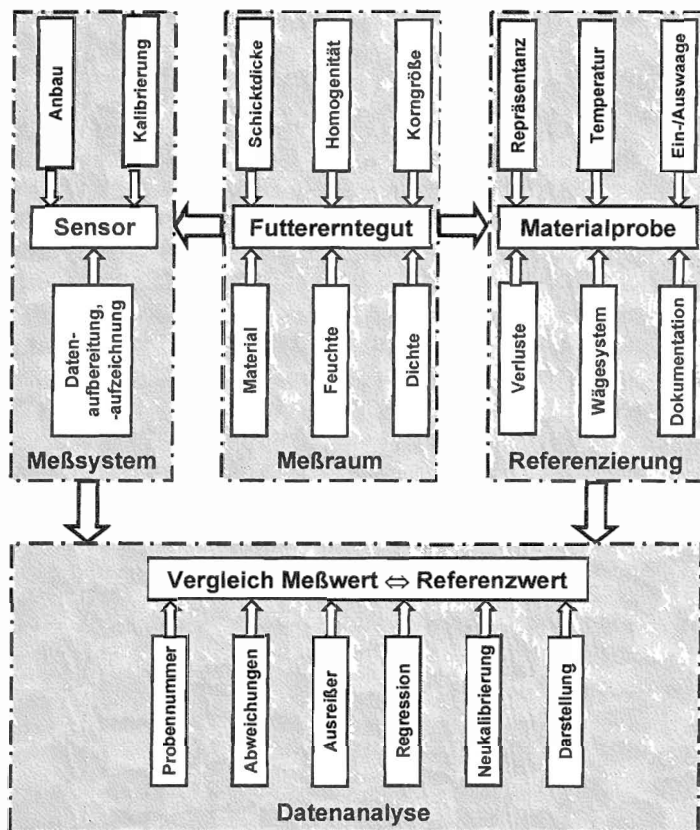


Abbildung 63: Einflußfaktoren auf die Bewertung von Meßergebnissen

### 6.1.2 Bewertung der Feldversuche zur Durchsatzermittlung

Bei der Überprüfung der Genauigkeit des radiometrischen Meßsystems bei Feldversuchen wurden drei Probleme deutlich. Erstens war auf mobilen Plattformwaagen die erforderliche Genauigkeit für Referenzwiegungen nicht gewährleistet. Feuchtigkeit, Temperaturschwankungen und unebener Boden ließen die Nullpunkte der Systeme driften. Deshalb sollten Referenzwiegungen grundsätzlich nur auf geeichten Fuhrwerkswaagen durchgeführt werden.

Zweitens muß während der Ernte genau darauf geachtet werden, daß alles geerntete Material auf den Anhänger überladen wird. Eine kurzzeitige Unachtsamkeit von nur einer Sekunde verursacht bei einem Durchsatz von 100 t/h einen Fehler von -0,93 %. Bei einer Zuladung von 3000 kg ergibt das eine Abweichung von -0,93 %. Ein ähnlicher Fehler entsteht beim Verlust von Ladung auf dem Weg zur Fuhrwerkswaage. Dieser Fehler ist vermeidbar, indem die Anhänger nicht komplett gefüllt werden.

Drittens werden bei Regen, der gleichbedeutend mit viel Oberflächennässe ist, die Meßergebnisse unbrauchbar, da eine undefinierte Menge an Wasser die  $\gamma$ -Strahlung undefiniert absorbiert.

Unter Beachtung dieser drei Einschränkungen konnten während der Feldversuche mit dem radiometrischen Meßsystem repräsentative Ergebnisse erzielt werden, die als Basis für die Berechnung der Gesamtfeuchte herangezogen wurden.

### 6.1.3 Bewertung der Probenahme bei Feldversuchen

Über den Versuchszeitraum von drei Jahren wurden am Feldhäcksler Maisproben direkt aus dem Auswurfkrümmer und aus dem Anhänger entnommen. Die Entnahme der Referenzmaterialien aus dem Auswurfkrümmer zeigte deutliche Abweichungen bei den Ergebnissen verglichen zu denen aus dem Anhänger. Für Gras führte diese Entnahmetechnik wiederholt zu Verstopfung der Erntemaschine.

Die Probenahme aus dem Anhänger zeigte die besten Ergebnisse, wenn nach Beerntung von Parzellen mit ungefähr 30 m Länge eine Mischprobe beim Abkippen gezogen wurde. Bei einer Erntemenge von nur 800 kg konnte die Probe

als repräsentativ bewertet werden. Mischproben aus einer kompletten Anhängeladung spiegelten den tatsächlichen Feuchtwert nicht optimal wieder. Bei dieser Art der Beprobung waren Standardabweichungen von 5 % keine Seltenheit. Dieser Einfluß auf eine spätere Kalibrierung kann nur durch eine große Anzahl an Proben ausgeglichen werden. Der Anforderung nach einer exakten Beprobung der Feldversuche konnte während des gesamten Versuchszeitraumes nicht nachgekommen werden. Diesem Anspruch könnte nur durch eine automatische Beprobung mit Zeit- und Ortsreferenz Rechnung getragen werden.

#### **6.1.4 Bewertung der Praxisversuche zur Feuchtemessung**

Das erste Versuchsjahr zeigte deutlich, daß die bekannten Meßverfahren Feuchte in Mais erfassen können. Aufgrund technischer Schwierigkeiten liegen für die Grasbergung keine brauchbaren Ergebnisse vor. Die Montage der Sensoren wurde gemäß der theoretischen Überlegungen mit einfachsten Mitteln vorgenommen. Eine Aussage bezüglich der Genauigkeit war zu diesem Zeitpunkt noch nicht möglich, da zum einen der Sensor aufgrund der Anbauposition und zum anderen das Probenahmeverfahren keine verlässlichen Ergebnisse lieferten. Der in der Auswurfklappe der Rundballenpresse montierte kapazitive Feuchtesensor zeigte sehr stark schwankende Ergebnisse an, deren Zuordnung zu einer Referenz unmöglich war.

Für das darauffolgende Testjahr erfolgten Änderungen der Anbauposition im Hinblick auf eine Verbesserung der Meßergebnisse. Am selbstfahrenden Feldhäcksler „blickten“ nun alle Meßsysteme von oben in den Auswurfkamin. Der Einsatz einer Glasscheibe für die NIR-Systeme brachte den gewünschten Erfolg, daß die Meßoptik in der Regel nicht verschmutzte. Die einzige Einschränkung für den Einsatz dieses Meßverfahrens zeigte ein Systemtest in Klee gras. Dabei wurde die Innenseite des Auswurfkamins und damit auch das Meßfenster der NIR- Meßsysteme komplett mit einer hartnäckigen Schmutzschicht überzogen, so daß die Sensoren keinen Materialkontakt mehr hatten. Innerhalb von zwei Jahren mußte nur eine Glasscheibe wegen Bruch getauscht werden. Der Verschleiß an einer normalen Fensterglasscheibe von 100 x 100 mm war so gering, daß die Scheibe 400 h standhielt, ohne blind zu werden.

Im Erntejahr 1998 wurden die in Tabelle 24 aufgelisteten Ergebnisse erzielt.

Tabelle 24: Ergebnisse der Feldversuche 1998.

Sensorsystem	Litronic FMS	MESA MM55	Perten DA7000
Anzahl der Proben	316	316	82
Feuchtebereich [%]	43,1 – 73,8	43,1 – 73,8	57,4 – 68,6
Mittlere Abweichung [%]	-0,6	0,4	0,0
Standardabweichung [%]	30,84	7,88	1,39 (absolut)
Bestimmtheitsmaß	0,035	0,254	0,774

Diese Ergebnisse zeigten deutlich, daß mit der vorhandenen Anordnung der Meßsysteme eine Feuchtemessung mit den NIR-Systemen gut möglich war. Zudem ist ebenfalls eine kontinuierlich arbeitende Inhaltsstoffbestimmung auf den Maschinen realisierbar. Die Meßgenauigkeit des kapazitiven Litronic FMS war weit von den Anforderungen entfernt, was größtenteils auf die Durchsatzabhängigkeit zurückzuführen sein dürfte.

Als Resultat aus diesen Ergebnissen wurden für das Erntejahr 1999 weitere Versuche mit dem Perten DA7000 geplant, das die besten Ergebnisse bei der Feuchtemessung und erste Resultate einer Inhaltsstoffbestimmung lieferte. Sobald diese Ergebnisse der Firma MESA bekannt waren wurde der MESA MoistuRite Sensor entwickelt, der die mechanischen und elektronischen Anforderungen an ein Feuchtemeßsystem für Futtererntemaschinen komplett erfüllen sollte. Nach dem Ausstieg der Firma Liebherr aus diesem Projekt wurde von Seiten der Firma Arnold ein Sensor bereitgestellt, der nur noch 20 mm Mindestbedeckung benötigte. Diese Angabe konnte nur in einem kurzen Labortest geprüft werden.

Der anschließende Feldtest ergab, daß mittels NIR-Meßsystemen eine Feuchtemessung mit der gewünschten Genauigkeit von  $\pm 5$  % unabhängig von Masseflußeigenschaften möglich ist. Es kam wiederum der MESA MM55 Meßkopf zum Einsatz, da das MESA MoistuRite System auf der Maschine keine stabilen Werte ausgab. Aufgrund einer falschen Kalibrierung lieferte das Perten DA7000 keine verwertbaren Daten. Der kapazitive Feuchtesensor der Firma Arnold zeigte deutliche Abhängigkeiten von der Schichtdicke und zusätzlich vom Neigungswinkel des Auswurfkamins, was eventuell auf unterschiedlichen Andruck des Materials an die Sensoroberfläche zurückzuführen wäre.

An der Rundballenpresse eigneten sich die Anbaupositionen in der Seitenwand und im Zuführkanal zur Ballenkammer nicht, um referenzierbare Ergebnisse zu

erzielen. Ohne konstruktive Änderungen an der Rundballenpresse ist die Feuchtemessung mit kapazitiven Sensoren nicht möglich. Für NIR Sensoren fehlte der Anbauraum.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, daß mit der NIR Technologie ein zuverlässiges Meßverfahren verfügbar ist, das die Anforderungen innerhalb der Maisbergung erfüllt, solange der „Sichtkontakt“ zum Material gewährleistet ist. Für Gras ist anzumerken, daß aufgrund des sehr inhomogenen Materialflusses im Feldhäcksler deutlich schwierigere Bedingungen für eine Messung anzutreffen sind. Dieses wirkt sich vor allem auf die Gesamtfeuchteberechnung aus. Soweit Informationen vorlagen, bestehen keine legislativen Beschränkungen für den weltweiten Einsatz dieser Technologie. Grundsätzlich wird eine durchgehende Qualitätskontrolle hinsichtlich der Feuchte bei der Futtererzeugung technisch machbar. Mit Kosten von mindestens € 8500.- für ein NIR-System ist derzeit aber kein Sensorsystem verfügbar, das wirtschaftlich eingesetzt werden könnte. Zudem sind die verfügbaren NIR Systeme nicht robust genug für den Serieneinbau auf Erntemaschinen und mit den integrierten Steuereinheiten zu komplex.

## **6.2 Verfahrenstechnische Einordnung**

So wichtig das Wissen um die Gewinnung repräsentativer Feuchtemeßwerte ist, so wichtig ist aber auch das Wissen, welcher Nutzen aus diesen Informationen gezogen werden kann und wie diese die gesamte Prozeßkette der Futterbergung beeinflussen können.

Beginnend beim Feldeinsatz dieses Systems ist es mit Kenntnis der idealen Erntefeuchte möglich, den optimalen Einsatzzeitpunkt für die Futterbergung zu bestimmen. Dies bedeutet, daß nach dem Einfahren in einen Bestand das Feuchteniveau bestimmt und eine Entscheidung für oder gegen eine weitere Beerntung gefällt werden kann. Weiter bietet der Feuchtwert in Kombination mit dem Durchsatzwert eine Steuergröße für das kontinuierliche Einbringen von Siliermittel auf dem Feldhäcksler oder der Rundballenpresse. Sind mehrere Silos auf einem Betrieb vorhanden, ist auch eine feuchtebasierte Trennung und Durchmischung unterschiedlicher Silagequalität denkbar.



Speziell bei der Ballenbergung ist die Feuchte ein wichtiges Kriterium, die Lagerfähigkeit beispielsweise von Heu und Stroh zu garantieren. Bei der Bergung solcher Materialien ist eine Entscheidung über direkte Einlagerung oder vorherige Trocknung basierend auf den TS-Werten möglich. Werden Ballen nach Feuchtekategorien sortiert, kann eine optimierte Beschickung einer Ballentrocknungsanlage mit jeweils gleich feuchtem Material geschehen.

Im Rahmen von Flottenmanagementsystemen würde die Kenntnis der Feuchte zum Erntezeitpunkt eine Koordinierung der Anlieferung von Material an Trocknungs- und Pelletierungsanlagen erleichtern. Zu regelnde Größen in diesem Prozeß sind zum einen der Durchsatz in der Anlage und zum anderen die Anlieferungsgeschwindigkeit.

Basierend auf der Trockensubstanz eröffnet sich für den Landwirt die Chance, seinen Silovorrat optimal dem Futterbedarf seines Betriebes anzupassen, zu große Silagemengen zu vermeiden und Überproduktionen anderweitig zu nutzen, das heißt beispielsweise nicht im Silo benötigten Mais als Körnermais zu verkaufen.

Erst die Kenntnis der Feuchte und die damit mögliche Erstellung von Trockenmasse-Ertragskarten schafft die Basis für den Vergleich von Ertragswerten über mehrere Jahre. Prozentual dargestellte TM-Erträge über mehrere Jahre innerhalb unterschiedlicher Ernteprodukte innerhalb der Fruchtfolge bilden übereinandergelegt einen Baustein für Teilflächenwirtschaft. Eine Feuchtekarte erlaubt zudem Rückschlüsse auf die Homogenität beziehungsweise Inhomogenität einer Fläche. Das 1998 in Holzheim beerntete Maisfeld weist extrem trockene Zonen auf (Abbildung 64). Nach Rücksprache mit dem Landwirt befindet sich dort eine Kiesader, die die Wasserspeicherung im Ackerboden deutlich vermindert. Sind solche Informationen nicht vorhanden, kann aufgrund der Feuchtekarte nach Ursachen für diese Phänomene gezielt gesucht werden. Dagegen zeigt eine Betrachtung der Trockenmasseerträge, daß die gesamte Fläche ein relativ einheitliches Ertragsniveau besitzt (Abbildung 69).

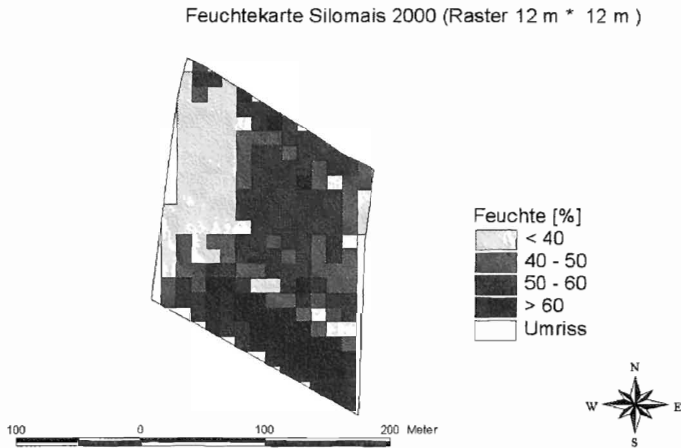


Abbildung 64: Feuchtekarte der Silomaiserte in Holzheim 1998.

Ein vorhandener Feuchtesensor eröffnet dem Lohnunternehmer die Chance, weitere Abrechnungsmodalitäten für Erntedienstleistungen zu schaffen – beispielsweise basierend auf geernteter Trockenmasse. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß eine Eichung solcher Meßsysteme auf mobilen Einheiten schwer möglich sein wird. Mit dem exakten Wissen des Landwirts über den Inhalt seines Silos oder Ballenvorrates kann die **Futtermitteldosierung** genauer erfolgen.

Bei all den aufgezeigten Möglichkeiten zur Nutzung der Feuchteinformation bei der Ernte handelt es sich nur um Ansätze, die in ihrer Umsetzbarkeit und Rentabilität im jeweiligen Anwendungsfall einzeln zu prüfen sind.

### 6.3 Weiterführende Arbeiten

Aus dem Projekt „Feuchtemessung in Futtererntemaschinen“ ergeben sich direkte und indirekte Ansätze für weitergehende Untersuchungen. Im Bereich der Meßtechnik für den Feldhäcksler sind fundierte Untersuchungen während der Grasernte notwendig. Parallel dazu müssen die vorhandenen Kalibrierungen bis zur Einsatzreife weiter entwickelt werden. Dabei wären unter anderem Berechnungsansätze mit nichtlinearen Kalibrierfunktionen durchzuführen, da diese Potential für deutliche Verbesserungen in sich bergen. Dieses gesamte System ist anschließend in die Elektronik der Erntemaschine zu integrieren.

Bezüglich der Ballenpressen kann erst nach konstruktiven Anpassungen eine neue Untersuchung begonnen werden. Dies bedeutet, daß die meisten Schritte des Projektplans erneut durchlaufen werden müssen. Um den gesamten Bereich der Futterernte abzudecken, sind auch Arbeiten am Ladewagen notwendig.

Nach einer Kostenrechnung ergibt sich die Möglichkeit, exakte Kostenziele für ein Meßsystem aufzustellen, die anschließend umzusetzen wären. Ebenso sind Optimierungsansätze für den Ernteprozeß basierend auf der Masse- und Feuchtemessung durchzuführen. Bei den derzeitigen Preisen für NIR-Meßsysteme ist auch die Entwicklung eines kostengünstigen Feuchtesensors als eine Fortführung dieser Arbeit zu sehen. Dies könnte beispielsweise mittels Dioden geschehen, die nur die für eine Feuchtebestimmung benötigten Wellenlängen detektieren. Somit würden teure Filterräder oder Diodenzeilen entfallen.

Das wohl größte Potential für eine Weiterführung der Arbeit dürfte in der kontinuierlichen Inhaltsstoffbestimmung liegen. Erst diese ermöglicht exakte Aussagen über die tatsächliche Qualität eines Erntegutes und die Menge der dem Boden entzogenen Nährstoffe. Auf Diodenarrays basierende NIR-Systeme können heute bis zu zehn verschiedene Parameter gleichzeitig erfassen. Das Hauptproblem dabei stellt zum einen die sehr komplexe Erstellung stabiler Kalibrierungen, zum anderen die anschließende Referenzierung der Ergebnisse dar. Weltweit fehlende Referenzstandards lassen diese Qualitätsbestimmung zu einem Politikum unüberschaubarer Reichweite werden und stellen gleichzei-

tig sehr hohe Anforderungen an die Personenkreise, die dieses System einführen möchten.

Zudem bleibt noch die Aufgabe, ökonomisch und ökologisch sinnvolle Umsetzungs- und Anwendungsstrategien für die gewonnenen Daten zu entwickeln. Die Investition in ein Feuchte- oder Inhaltsstoffmeßsystem muß sich innerhalb eines bestimmten Zeitraumes auszahlen. Um dieses nachzuweisen, sind umfassende Kalkulationen anzustellen, die zeigen, unter welchen Umständen dieser Kostenaufwand gerechtfertigt sein kann.

## 7 Zusammenfassung

Der Strukturwandel zu größeren Betrieben und wachsende Anforderungen an Informations- und Kommunikationstechnik erfordern neue Werkzeuge, diese komplexen Systeme zu regeln. Bei der Einführung moderner Managementsysteme in der Landwirtschaft entwickelt sich die Feuchtemessung zu einer der Schlüsseltechnologien im Bereich der Qualitätskontrolle.

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften des Wassers kann dieses in Feststoffen mit unterschiedlichen Prinzipien gemessen werden. Die zu messenden Feststoffe – Futtererntegüter – lassen sich durch einen Feuchtegehalt zwischen 8 % und 90 % und ihre inhomogene Struktur charakterisieren. Im Zusammenhang mit den stark schwankenden Durchsätzen in Erntemaschinen ergeben sich Meßbedingungen, die die Genauigkeit der bekannten Feuchtemeßverfahren stark herabsetzen können. Die wenigen bekannten Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet und die geringe Anzahl der auf dem Markt verfügbaren Feuchtemeßsysteme zur kontinuierlichen Feuchtemessung in Futtererntegütern zeigen, daß diese Meßaufgabe zahlreiche Schwierigkeiten in sich birgt.

Einige Verfahren wurden von vornherein aufgrund des eingeschränkten Meßbereichs, ihrer Größe oder ihrer Zulassung im landwirtschaftlichen Bereich von weiteren Untersuchungen ausgeschlossen. Der theoretische Vergleich zwischen den Einflußfaktoren auf die grundsätzlich möglichen Meßprinzipien und den Rahmenbedingungen ergibt eine **theoretische Eignung** der Meßverfahren in folgender **Reihenfolge: Nahinfrarot-Reflexion, Mikrowellenreflexion, Kapazitive Meßverfahren, Dielektrische Meßverfahren, Mikrowellenresonator, Mikrowellentransmission und Nahinfrarottransmission**. Die Zusammensetzung der getesteten Systeme stellt einen Kompromiß aus dem theoretischen Optimum und den von Herstellerseite verfügbaren Systemen dar.

Der Test der einzelnen Feuchtemeßsysteme wurde zweistufig durchgeführt: als erstes erfolgte eine Versuchsreihe im Labor, die zum Ziel hatte, die grundsätzliche Eignung und den maximal erfaßbaren Feuchtebereich zu zeigen. Die definierten Bedingungen im Labor ermöglichten zudem die Erstellung von Grundkalibrierungen, die Evaluierung des Einflusses von Parametern wie Dichte und Schichtdicke auf die Meßergebnisse und eine Aussage über die mögliche Genauigkeit des jeweiligen Systems. Der Versuch, die im Labor erfolgreich gete-

steten Systeme in die Erntemaschine zu integrieren, warf neue Probleme auf. Für die Ballenpresse konnte während der gesamten Versuchszeit keine geeignete Anbauposition gefunden werden, was unter anderem an den eingeschränkten Zugangsmöglichkeiten zum Materialstrom in der verfügbaren Rundballenpresse lag. Am Feldhäcksler dagegen erwies sich die Anbauposition im Auswurfkamin als nahezu optimal. Mit Ausnahme der Gewichtseinschränkung bezüglich einsetzbarer Sensoren herrschten gute Bedingungen hinsichtlich Zugänglichkeit und Materialflußhomogenität. Einzig die Referenzierung der Meßergebnisse stellte sich problematisch dar. Die hohen Durchsätze im selbstfahrenden Feldhäcksler von 100 t/h und mehr erschwerten die Entnahme repräsentativen Probenmaterials. Streuungen innerhalb der Referenzergebnisse von bis zu  $\pm 5$  % verminderten die Aussagekräftigkeit der Genauigkeitsuntersuchung. Für eine Berechnung der Gesamtfeuchte wäre zudem ein genaues Verfahren zur Durchflußmessung notwendig, was derzeit für Futtererntemaschinen ebenfalls nicht verfügbar ist.

Bei den Laboruntersuchungen kristallisierten sich bereits die NIR-Meßverfahren als beste Verfahren für die Feuchtemessung in Futtererntegütern heraus. Mit einer Genauigkeit teilweise besser als  $\pm 1$  % und einem Bestimmtheitsmaß von 0,99 über den gesamten Feuchtebereich, unabhängig von Dichte und Schichtdicke, wurden sehr gute Ergebnisse erzielt. Sowohl Kapazitive- als auch Mikrowellenreflexions-Systeme zeigten im Labor unter konstanten Bedingungen Ergebnisse, die nur knapp innerhalb der geforderten Genauigkeit von  $\pm 5$  % lagen. Es wurde eine Abhängigkeit zwischen den Meßergebnissen dieser Verfahren, der Dichte und der Schichtdicke des Meßgutes festgestellt, die jedoch für die Erstellung eines Korrekturalgorithmus nicht deutlich genug war. Ursache für die starke Streuung der Ergebnisse dürfte unter anderem die Inhomogenität (Korngröße) der Erntematerialien sein.

Mit einer Standardabweichung von 4,40 % und einen Bestimmtheitsmaß von 0,823 des MESA MM55 und von 1,39 % und 0,774 des Perten DA7000 lagen die Ergebnisse der Feldtests mit den NIR- Meßsystemen trotz der fehlerbehafteten Referenzierung innerhalb der Genauigkeitsanforderungen. Dabei wurde Maissilage aus einem Bereich von 47 % bis 72 % Feuchte mit einer einzigen Kalibrierung gemessen. Die Ergebnisse der kapazitiven Meßsysteme waren abhängig von Materialdichte, Schichtdicke und Stellung des Auswurfkamins, was nicht zu kompensieren war. Bei der Erstellung von Kalibrierungen ist dar-

auf zu achten, daß diese für den typischen Feuchtebereich des jeweiligen Erntegutes aufgebaut werden.

Grundlegende Untersuchungen zur kontinuierlichen Inhaltsstoffbestimmung auf Feldhäckslern haben gezeigt, daß dies für Stärke und Rohprotein beziehungsweise Stickstoff möglich ist. Für weitere Parameter wäre der explizite Beweis der Meßbarkeit noch zu führen. Dies erfordert aufgrund der schwierigen Referenzierbarkeit einen sehr großen Probenumfang sowie umfangreiche Kenntnisse der Chemie. Ein solches komplexes System konfrontiert den Benutzer mit der Problematik, daß eine schnelle, einfache Kontrolle der Funktionsfähigkeit und Genauigkeit des Meßsystems nicht mehr möglich ist.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die NIR-Technologie eine geeignete Basis für eine kontinuierliche Feuchtemessung und eventuell auch Inhaltsstoffbestimmung auf Futtererntemaschinen darstellt. Mit der schnellen Weiterentwicklung elektronischer Komponenten und Sensoren ist zu erwarten, daß innerhalb weniger Jahre kostengünstige, robuste NIR-Meßsysteme auf dem Markt zu finden sind, die die Anforderungen aus dem Bereich der Qualitätskontrolle für Futtererntegüter erfüllen. Um optimale Meßergebnisse erzielen zu können, müßten die Landmaschinen an die Erfordernisse der Meßtechnik angepaßt werden und nicht umgekehrt – wie heute üblich.





## 8 Summary

In the last few years, one of the trends in production agriculture has been in the area of information gathering and management. One key trend is the emphasis more on quality aspects of crop, rather than on mass of crop. To ensure that a high level of seed or grain quality is deliverable, a widespread control system is required. This system needs to collect information through all steps of the crop production process. One of the most important parameters for crop harvesting is moisture content of the grain itself. Continuously working moisture measurement sensors are available for combine harvesters, but the development of a complimentary system for self propelled forage harvesters (SPFH) and balers is needed.

Harvested materials from a SPFH are characterised with having typical moisture contents from 9 % to 90 %. These materials are normally very inhomogeneous in structure. A material flow analysis for SPFH and round balers was completed for different mounting configurations within the material flow sections. Using this information a performance specification for moisture measurement on SPFH was prepared. The results of this analysis determined the optimum location for the moisture sensor is on the spout of the SPFH, and between 2 belts of the round baler.

Moisture measurement requires stable conditions for representative data sampling, and care in design was taken to minimise negative influences, which could impact sensor and measurement accuracy. To date, only a few research projects in this area have been completed. Commercially, manufacturers of moisture sensors have little experience measuring organic materials continuously under field conditions. Therefore, basic evaluations of different principles of measurement were evaluated to fulfill the performance specification.

Using the physical makeup of water, it is possible to measure the moisture content of solids through different measurement principles. A theoretical comparison of sensor capabilities and knowledge of material flow conditions was used to rank different measurement principles: near infrared reflectance, microwave reflectance, capacitance systems, dielectric systems, microwave resonator, microwave transmittance and near infrared transmittance. Selection of systems for evaluation was driven by theoretical inspection, and those systems

commercially available. Through evaluation and testing, the sensor systems were referenced to the oven drying method for comparison. Specifically, samples were dried in an oven at 105 °C for a period of 24 hours.

A laboratory evaluation was completed prior to field evaluation. Through laboratory testing, the measurement device was located on the test fixture to simulate the harvesting machine as close as possible. This test fixture allowed the possibility to vary material type, moisture content, material density, and layer thickness presented to the sensor. Tests were completed for grass silage, maize silage and hemp.

Lab tests quickly showed that NIR technology was capable of making accurate moisture readings of +/- 1 %. Capacitance sensors were seen to be within +/- 5 % under certain conditions. When operating over 9 % to 90 % moisture content however, the accuracy was only +/-10 %.

A John Deere 6950 SPFH and John Deere 580 round baler equipped with yield measurement systems were available for field testing. These systems are described by Auernhammer et al. 1995 [4] and Wild 1998 [47]. In addition to the known systems up to three moisture measurement systems were installed on both machines simultaneously. This allowed for direct comparison of different measuring principles directly. Calibrations from the lab testing were available and used for field sensor evaluation.

Due to the rough and altering conditions normal to agricultural harvesting equipment, the field results were not as positive. Problems occurred in the method for taking representative samples from the silage trailer for reference measurements in the drying oven. Testing determined that varying density and layer thickness had large influences on the results, especially for the capacitance measurement systems. Field results proved that a NIR based sensing systems are capable of +/-5 % accuracy for moisture measurement in silage.

Field tests with the Perten DA7000 diode array system delivered the possibility for moisture and ingredient measurements such as: protein, raw fibre, raw protein, nitrogen or energy. Calibration development and the ability for reference measurements is needed for further tests and evaluations.

Knowledge of exact moisture content for harvested materials offers many improvements for the feed production process. This information opens the following opportunities:

- Harvesting of crops with optimum moisture content.
- Application of silage additives based on throughput and moisture content.
- Determination of weather bale drying is needed.
- Feeding rations based on dry mass.
- Yield mapping based on dry yield.
- Knowledge about non-homogeneous soil within a field.

Further research and evaluation needs to be completed to arrive at a production ready moisture measurement system. The sensor system must be integrated into the electrical system of the harvesting machine, and design modifications may be needed for mounting the sensor system. Also, specialised calibrations for different crops must be developed.

Continuously working ingredient measurement on harvesting machines will be a challenging project for the future. This system has the potential for being a great quality control tool for production agriculture. To make this type of a system work, further work on calibration development, referencing methods and standardisation of sampling must be completed. In addition, certification of these measuring techniques needs to occur.



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] **Ahlgrimm, H.-J.:** Verschiedene Möglichkeiten der Feuchtegehaltsbestimmung. – In: Landbauforschung Völkenrode 2, 27. Jahrgang (1977), S. 97-104
- [2] **Aman, W. u.a.:** "elemente" Chemie II. Klett Schulbuchverlag 1993, 1. Auflage
- [3] **American Society of Agricultural Engineers:** ASAE S358.2: moisture measurement – forages. 1999
- [4] **Auernhammer, H., Demmel, M. and Pirro, P.J.M.:** Yield measurements on self propelled forage harvesters. ASAE Paper No. 95 1757, ASAE, St. Joseph, MI, USA 1995
- [5] **Auernhammer, H.:** Elektronik zur umweltverträglichen Bestandesführung. – In: Innovationen in Technik und Bauwesen für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Landwirtschaft: Vortragstagung 75 Jahre KTBL, Veitshöchheim, April 22, 1998. Hrsg.: Münster-Hiltrup: KTBL-Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverlag GmbH 1998, S. 64–78
- [6] **Barnett, N.G. und K.J. Shinnars:** Analysis of systems to measure mass-flow-rate and moisture on a forage harvester. ASAE Paper No. 98 1118, ASAE, St. Joseph, MI, USA 1998
- [7] **Bjerum, N.:** Structure and Properties of Ice. – Dan. Mat. Fys. Medd. 27, no. 1, 1951, S. 10, Fig. 3
- [8] **Black, G.:** Apparatus for monitoring the moisture content of hay as it is being formed into a bale. United States Patent, Nr. 4868491, 19.09.1989
- [9] **Bohman, C.:** Moisture sensing apparatus with movable probe in combination with an agricultural baler having a pickup. United States Patent, Nr. 4929904, 29.05.1990
- [10] **Böttinger, S.:** Landwirtschaftliche Ballenpresse. Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift: DE 19543343 A1, 22.11.1995
- [11] **Chung, J.H. und T.N. Verma:** Measurement of rice moisture during drying using resistance type sensors. – In: Applied Engineering in Agriculture 1991, Nr. 7, S. 630-635
- [12] **Deutsches Institut für Normung:** DIN 55350 T11: Grundbegriffe der Qualitätssicherung und Statistik. 1987
- [13] **Deutsches Institut für Normung:** DIN EN ISO 9001: Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen. 2000

- [14] **Diekhans, N.:** Meßvorrichtung an einer fahrbaren Erntemaschine. Europäisches Patentamt, Offenlegungsschrift: EP 0931446, 28.11.1998
- [15] **Diekhans, N.:** Meßvorrichtung zur Messung von Parametern in einer landwirtschaftlichen Maschine. Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift: DE19648126, 21.11.96
- [16] **Food and Agriculture Organization of the United Nations:** Wheat production 1999. Statistical Database FAOSTAT 2001 (<http://apps.fao.org>)
- [17] **Frey, H.:** Feuchte- Meß- Systeme für Betonzuschlagstoffe. Hrsg: Liebherr Mischtechnik GmbH: Selbstverlag 05.03.1997
- [18] **Gasteiger, A.:** On-line-Feuchtemessung. – In: Die Mühle + Mischfut-  
tertechnik 129 (1992), Heft 51/52, S. 749
- [19] **Groß, F. und K. Riebe:** Gärfutter – Betriebswirtschaft, Erzeugung, Verfütterung. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer 1974
- [20] **Kormann, G.:** Auswahl geeigneter Meßsensorik für die Feuchtemes-  
sung in Futtermertegütern. Diplomarbeit: Institut für Maschinenwesen  
Clausthal 1997
- [21] **Kromer, K.-H.:** Abschlußbericht: Ballenlinie. In: Ordner Ballenlinie Nr.  
3255, 1967, S. 2
- [22] **KTBL:** KTBL-Taschenbuch Landwirtschaft 1996/97 – Daten für die Be-  
triebskalkulation in der Landwirtschaft. Darmstadt: Kuratorium für  
Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft 1996
- [23] **Kupfer, K.:** Feuchtemessung an Zuschlagstoffen für die Betonherstel-  
lung unter Verwendung der Mikrowellenmeßtechnik. Diss. A: HAB  
Weimar 1990
- [24] **Kupfer, K.:** Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Meßverfahren, Ap-  
plikationen, Normen. Renningen – Malsheim: expert- Verlag 1997
- [25] **Lück, W.:** Feuchtemessung. – In: Profos, P. und T. Pfeifer: Handbuch  
der industriellen Meßtechnik. München, Wien: Oldenbourg 1994, S.  
1022, Tabelle 10.4
- [26] **Lück, W.:** Feuchtigkeit, Grundlagen, Messen, Regeln. München, Wien:  
Oldenbourg 1964
- [27] **Maier, S.:** Kontinuierliche Feuchtemessung in landwirtschaftlichen  
Erntemaschinen. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Freising – Wei-  
henstephan 1993
- [28] **Marcotte, D., Savoie, P., Martel, H. und R. Thériault:** Precision agri-  
culture for hay and forage crops: a review of sensors and potential app-  
lications. ASAE Paper No. 99 1049, ASAE, St. Joseph, MI, USA

- [29] **Martel, H. und P. Savoie:** Sensors to measure forage mass flow and moisture continuously. ASAE Paper No. 98 1050, ASAE, St. Joseph, MI, USA 1998
- [30] **Mayes, D.:** Grain quality monitor. United States Patent, Nr. 6100526, 08.08.2000
- [31] **Mexas, S. und G.H. Brusewitz:** Acoustic grain moisture meter. Transactions of the ASAE Jahrgang 1987, Nr. 30 (3), S. 853-857
- [32] **Naturland e.V.:** interne Mitteilung vom 31.03.2000
- [33] **Nelson, S.O. und A.W. Kraszewski:** Advances in sensing grain moisture content by microwave measurement. ASAE Paper No. 97 3071, ASAE, St. Joseph, MI, USA 1997
- [34] **Nelson, S.O., A.W. Kraszewski, C.V.K. Kandala und K.C. Lawrence:** High-frequency and microwave single-kernel moisture sensors. Transaction of the ASAE Jahrgang 1992, Nr. 35 (4), S. 1309-1314
- [35] **Peterreins, M.:** Grundsatzuntersuchungen zur Gleichstandsart bei Silomais. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Freising – Weihenstephan, 1999
- [36] **Quade, J.:** Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag GmbH 1993, 12. Auflage
- [37] **Rode M. und C. Paul:** Qualitätsmessungen in der Pflanzenzüchtung. – In: Innovation 7 (1999), S. 10-11
- [38] **Römer, G.:** Fahrbare Halmgut-Erntemaschine, wie Ballenpresse und Ladewagen mit Aufsammlervorrichtung (Pickup) oder Mähdescher. Deutsches Patentamt, Patentschrift DE3232746, 08.09.82
- [39] **Snell, H., Kulig, B., Oberndorfer, C., Lücke, W. und H. Van den Weghe:** Einsatz hochfrequenter elektromagnetischer Felder zur schnellen Feuchtebestimmung in Silomais und Gras. – In: Tagung Landtechnik 2000. VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 101-107
- [40] **Steinhöfel, O.:** Kolbenreife ist der Maßstab. – In: Neue Landwirtschaft Jahrgang 1999, Nr. 8, S. 56-59
- [41] **Stowell, D.:** Baler-mounted continuous moisture monitoring system. United States Patent, Nr. 4812741, 14.03.1989
- [42] **Sudbrack, C. und R. Strosser:** Bale moisture limit monitoring. United States Patent, Nr. 4815373, 28.05.1989
- [43] **VDLUFA:** Die chemische Untersuchung von Futtermitteln. Methodenbuch Band III. 4. Erg. Darmstadt: VDLUFA-Verlag 1997
- [44] **Verband Deutscher Ingenieure (VDI):** VDI-Richtlinie 2225: Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Düsseldorf: VDI-Verlag 1977
- [45] **Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.:** VDMA 24351

- Trocknungstechnik – Trocknungstechnische Grundbegriffe. Berlin: Beuth- Verlag 1999
- [46] **Vogler E., Wienefeld H. und U. Marahrens:** Die Futterkonservierung – Ein Ratgeber für die Praxis. Hildesheim: Verlag Th. Mann 1972
- [47] **Wild, K.:** Satellitengestützte Arbeitszeiterfassung und Ertragsermittlung in Rundballenpressen. Hrsg.: Freising: Institut für Landtechnik 1998, MEG Schrift 325
- [48] **Wright, S., Johnson, D. und R. Welle:** Near infrared spectrometer used in combination with an agricultural implement for real time grain and forage analysis. United States Patent, Nr. 5 991 025, 23.11.1999
- [49] **Zscheischler, J.:** Mais, Anbau und Verwertung; DLG-Verlag: Frankfurt am Main 1979, S.115

## **Software**

**Autodesk:** AutoCAD, Version 2000, San Raffael, CA, USA, 1999

**Microsoft:** Excel 97 SR 2, Redmond, WA, USA, 1997

**Microsoft:** PowerPoint 97 SR 2, Redmond, WA, USA, 1997

**Microsoft:** Word 97 SR 2, Redmond, WA, USA, 1997

**STIEGELE Datensysteme GmbH:** MGraph, Version 1.0,  
Rothenburg o.d.T., 1998

**STIEGELE Datensysteme GmbH:** MLab, Version 1.0,  
Rothenburg o.d.T., 1998



## 10 Anhang

Im Anhang zu dieser Arbeit sind Erläuterungen und Einzelergebnisse zu den einzelnen Kapiteln der Dissertation erhalten.

### 10.1 Anhang Material und Methoden

#### 10.1.1 Theoretische Bewertung der Feuchtemeßverfahren

Die theoretische Eignung der unterschiedlichen physikalischen Grundprinzipien für die Feuchtemessung in Futtererntemaschinen wird gemäß der VDI-Richtlinie 2225 [44] durchgeführt.

Im ersten Schritt werden Grundvoraussetzungen definiert, die erfüllt = 1 oder nicht erfüllt = 0 sein können. Um eine Lösung weiter in Betracht zu ziehen, muß das Produkt dieser „ja/nein“-Entscheidungen gleich eins sein. Als nächstes erfolgt die Festlegung von Bewertungskriterien, die anschließend mit Gewichtungsfaktoren belegt werden. Die Summe aller Gewichtungsfaktoren muß dabei den Wert eins ergeben. Die Wertvorstellungen werden durch Vergabe von Punkten ausgedrückt, wobei 0 für eine absolut unbrauchbare Lösung und 4 für eine sehr gute Lösung steht. Diese Werte werden mit der dazugehörigen Gewichtung multipliziert und die gewichteten Werte summiert. Diese daraus resultierende Summe ist eine Maß für die Qualität der Lösung. Die grundsätzliche Machbarkeit geht abschließend in das Produkt aus A mal E ein. Je näher der Wert an vier liegt, desto besser ist die Lösung.

Bei dieser theoretischen Betrachtung erzielt die Nahinfrarotreflexion mit 3,14 das beste Ergebnis. Die radiometrischen Meßverfahren scheiden für weitere Betrachtungen aus, da deren Einsatz nicht uneingeschränkt erlaubt ist.

Tabelle 25: Bewertung der elektrischen Verfahren.

Laufende Nr.	Kriterium	Gewichtung	Meßverfahren					
			Leitfähigkeit		Dielektrisch		Kapazitiv	
			Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert
<b>Grundvoraussetzungen [0/1] Bewertung</b>								
1	Meßbereich		0		1		1	
2	Betriebserlaubnis		1		1		1	
A	<i>Produkt</i>		0		1		1	
<b>Technisch- mechanische Kriterien</b>								
3	Abmessungen	0,10	4	0,40	4	0,40	4	0,40
4	Gewicht	0,10	4	0,40	4	0,40	4	0,40
5	Robustheit	0,10	3	0,30	4	0,40	4	0,40
6	Leistungsbedarf	0,06	4	0,24	4	0,24	4	0,24
7	Mindestschichtdicke	0,05	0	0,00	1	0,05	1	0,05
B	<i>Summe (3 bis 7)</i>	<i>0,41</i>	<i>15</i>	<i>1,34</i>	<i>17</i>	<i>1,49</i>	<i>17</i>	<i>1,49</i>
<b>Einflußfaktoren auf das Meßverfahren</b>								
8	Materialtemperatur	0,02	2	0,04	2	0,04	2	0,04
9	Dichte	0,10	2	0,20	1	0,10	1	0,10
10	Schichtdicke	0,10	2	0,20	2	0,20	2	0,20
11	Korngröße	0,08	2	0,16	2	0,16	2	0,16
12	Sensorandruck	0,05	2	0,10	2	0,10	2	0,10
13	Materialhomogenität	0,10	1	0,10	1	0,10	2	0,20
14	Fremdelektrolytgehalt	0,01	1	0,01	2	0,02	3	0,03
15	Materialfarbe	0,04	4	0,16	4	0,16	4	0,16
16	Fremdlicht	0,01	4	0,04	4	0,04	4	0,04
17	Meßgut	0,01	3	0,03	3	0,03	2	0,02
18	elektromagn. Strahlung	0,01	2	0,02	3	0,03	2	0,02
19	Materialgeschwindigkeit	0,05	3	0,15	3	0,15	3	0,15
C	<i>Summe (8 bis 19)</i>	<i>0,58</i>	<i>28</i>	<i>1,21</i>	<i>29</i>	<i>1,13</i>	<i>29</i>	<i>1,22</i>
<b>Betriebswirtschaftliche Kriterien</b>								
20	Systempreis	0,01	4	0,04	3	0,03	3	0,03
D	<i>Summe (20)</i>	<i>0,01</i>	<i>4</i>	<i>0,04</i>	<i>3</i>	<i>0,03</i>	<i>3</i>	<i>0,03</i>
E	<i>Gesamt (B+C+D)</i>	<i>1,00</i>	<i>47</i>	<i>2,59</i>	<i>49</i>	<i>2,65</i>	<i>49</i>	<i>2,74</i>
F	<i>Gesamtbewertung (A*E)</i>		<i>0</i>	<i>0,00</i>	<i>49</i>	<i>2,65</i>	<i>49</i>	<i>2,74</i>

Tabelle 26: Bewertung der Mikrowellenverfahren.

Laufende Nr.	Kriterium	Gewichtung	Meßverfahren					
			Mikrowellen Transmission		Mikrowellen Reflexion		Mikrowellen Resonator	
			Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert
<b>Grundvoraussetzungen [0/1] Bewertung</b>								
1	Meßbereich		1		1		1	
2	Betriebserlaubnis		1		1		1	
A	<i>Produkt</i>		1		1		1	
<b>Technisch- mechanische Kriterien</b>								
3	Abmessungen	0,10	2	0,20	4	0,40	3	0,30
4	Gewicht	0,10	2	0,20	4	0,40	2	0,20
5	Robustheit	0,10	3	0,30	4	0,40	3	0,30
6	Leistungsbedarf	0,06	1	0,06	3	0,18	3	0,18
7	Mindestschichtdicke	0,05	3	0,15	1	0,05	1	0,05
B	<i>Summe (3 bis 7)</i>	<i>0,41</i>	11	0,91	16	1,43	12	1,03
<b>Einflußfaktoren auf das Meßverfahren</b>								
8	Materialtemperatur	0,02	2	0,04	2	0,04	2	0,04
9	Dichte	0,10	2	0,20	2	0,20	2	0,20
10	Schichtdicke	0,10	2	0,20	4	0,40	2	0,20
11	Korngröße	0,08	2	0,16	2	0,16	2	0,16
12	Sensorandruck	0,05	4	0,20	4	0,20	4	0,20
13	Materialhomogenität	0,10	3	0,30	1	0,10	3	0,30
14	Fremdelektrolytgehalt	0,01	3	0,03	3	0,03	3	0,03
15	Materialfarbe	0,04	4	0,16	4	0,16	4	0,16
16	Fremdlicht	0,01	4	0,04	4	0,04	4	0,04
17	Meßgut	0,01	1	0,01	1	0,01	1	0,01
18	elektromagn. Strahlung	0,01	1	0,01	1	0,01	2	0,02
19	Materialgeschwindigkeit	0,05	2	0,10	2	0,10	0	0,00
C	<i>Summe (8 bis 19)</i>	<i>0,58</i>	30	1,45	30	1,45	29	1,36
<b>Betriebswirtschaftliche Kriterien</b>								
20	Systempreis	0,01	1	0,01	3	0,03	3	0,03
D	<i>Summe (20)</i>	<i>0,01</i>	1	0,01	3	0,03	3	0,03
E	<i>Gesamt (B+C+D)</i>	<i>1,00</i>	42	2,37	49	2,91	44	2,42
F	<i>Gesamtbewertung (A*E)</i>		42	2,37	49	2,91	44	2,42

Tabelle 27: Bewertung des TDR-Verfahrens und der Nahinfrarotverfahren.

Laufende Nr.	Kriterium	Gewichtung	Meßverfahren					
			TDR		Nahinfrarot Transmission (NIT)		Nahinfrarot Reflexion (NIR)	
			Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert
<b>Grundvoraussetzungen [0/1] Bewertung</b>								
1	Meßbereich		0		1		1	
2	Betriebserlaubnis		1		1		1	
<b>A</b>	<b>Produkt</b>		0		1		1	
<b>Technisch- mechanische Kriterien</b>								
3	Abmessungen	0,10	2	0,20	2	0,20	3	0,30
4	Gewicht	0,10	4	0,40	3	0,30	3	0,30
5	Robustheit	0,10	2	0,20	3	0,30	3	0,30
6	Leistungsbedarf	0,06	3	0,18	3	0,18	3	0,18
7	Mindestschichtdicke	0,05	0	0,00	2	0,10	4	0,20
<b>B</b>	<b>Summe (3 bis 7)</b>	<b>0,41</b>	11	0,98	13	1,08	16	1,28
<b>Einflußfaktoren auf das Meßverfahren</b>								
8	Materialtemperatur	0,02	2	0,04	1	0,02	1	0,02
9	Dichte	0,10	1	0,10	1	0,10	4	0,40
10	Schichtdicke	0,10	1	0,10	1	0,10	4	0,40
11	Korngröße	0,08	2	0,16	2	0,16	3	0,24
12	Sensordruck	0,05	3	0,15	3	0,15	3	0,15
13	Materialhomogenität	0,10	3	0,30	3	0,30	3	0,30
14	Fremdelektrolytgehalt	0,01	3	0,03	4	0,04	4	0,04
15	Materialfarbe	0,04	4	0,16	2	0,08	2	0,08
16	Fremdlicht	0,01	4	0,04	1	0,01	1	0,01
17	Meßgut	0,01	1	0,01	2	0,02	2	0,02
18	elektromagn. Strahlung	0,01	2	0,02	3	0,03	3	0,03
19	Materialgeschwindigkeit	0,05	0	0,00	3	0,15	3	0,15
<b>C</b>	<b>Summe (8 bis 19)</b>	<b>0,58</b>	26	1,11	26	1,16	33	1,84
<b>Betriebswirtschaftliche Kriterien</b>								
20	Systempreis	0,01	3	0,03	2	0,02	2	0,02
<b>D</b>	<b>Summe (20)</b>	<b>0,01</b>	3	0,03	2	0,02	2	0,02
<b>E</b>	<b>Gesamt (B+C+D)</b>	<b>1,00</b>	40	2,12	41	2,26	51	3,14
<b>F</b>	<b>Gesamtbewertung (A*E)</b>		0	0,00	41	2,26	51	3,14

Tabelle 28: Bewertung der radiometrischen Verfahren.

Laufende Nr.	Kriterium	Gewichtung	Meßverfahren			
			Kern- resonanz		Kern- strahlung	
			Wert	gew. Wert	Wert	gew. Wert
<b>Grundvoraussetzungen [0/I] Bewertung</b>						
1	Meßbereich		1		1	
2	Betriebserlaubnis		0		0	
A	<i>Produkt</i>		0		0	
<b>Technisch- mechanische Kriterien</b>						
3	Abmessungen	0,10	0	0,00	3	0,30
4	Gewicht	0,10	0	0,00	3	0,30
5	Robustheit	0,10	2	0,20	3	0,30
6	Leistungsbedarf	0,06	0	0,00	3	0,18
7	Mindestschichtdicke	0,05	2	0,10	2	0,10
B	<i>Summe (3 bis 7)</i>	<i>0,41</i>	4	0,30	14	1,18
<b>Einflußfaktoren auf das Meßverfahren</b>						
8	Materialtemperatur	0,02	4	0,08	4	0,08
9	Dichte	0,10	3	0,30	2	0,20
10	Schichtdicke	0,10	3	0,30	2	0,20
11	Korngröße	0,08	2	0,16	2	0,16
12	Sensorandruck	0,05	2	0,10	4	0,20
13	Materialhomogenität	0,10	3	0,30	2	0,20
14	Fremdelektrolytgehalt	0,01	4	0,04	4	0,04
15	Materialfarbe	0,04	4	0,16	4	0,16
16	Fremdlicht	0,01	4	0,04	4	0,04
17	Meßgut	0,01	4	0,04	2	0,02
18	elektromagn. Strahlung	0,01	2	0,02	3	0,03
19	Materialgeschwindigkeit	0,05	2	0,10	3	0,15
C	<i>Summe (8 bis 19)</i>	<i>0,58</i>	37	1,64	36	1,48
<b>Betriebswirtschaftliche Kriterien</b>						
20	Systempreis	0,01	0	0,00	2	0,02
D	<i>Summe (20)</i>	<i>0,01</i>	0	0,00	2	0,02
E	<i>Gesamt (B+C+D)</i>	<i>1,00</i>	41	1,94	52	2,68
F	<i>Gesamtbewertung (A*E)</i>		0	0,00	0	0,00



### 10.1.2 Übersicht der verfügbaren Feuchtemeßsysteme

Folgende Tabelle enthält eine Übersicht über auf dem Markt verfügbare Feuchtemeßsysteme. So weit möglich wurden charakteristische Eigenschaften des jeweiligen Meßsystems mit aufgelistet.

Tabelle 29: Übersicht über die verfügbaren Feuchtemeßsysteme.

Hersteller	Systemname	Meßprinzip	Abmessungen BxHxT [mm] <sup>11)</sup>	Gewicht [kg]	Meßbereich [%]	Leistungsbedarf [VA]	Mindestbedeckung [mm]	Materialabstand [mm]	Meßfleck [cm <sup>2</sup> ]	Systempreis[€] <sup>12)</sup>
<b>Leitfähigkeitsmeßsysteme</b>										
DELMHORST INSTR.	FX2000	Leitfähigkeit	70x50x5	0,3	10 – 40	k. A.	k. A.	0	k. A.	420.-
<b>Dielektrische Meßsysteme</b>										
AHLBORN	FH A696 MF	Dielektrisch	70 x 70 x 150	0,26	0 - 20	k. A.	> 60	0	k. A.	2000.-
<b>Kapazitive Meßsysteme</b>										
ARNOLD	FSV	Kapazitiv	Ø76 x 65	0,75	8 – 90	1	> 60	0	44	1690.-
Liebherr Mischtechnik	Litronic FMS	Kapazitiv	Ø98 x 47	1,4	0 – 100	k. A.	> 60	0	44	7400.-
<b>Mikrowellentransmissionssysteme</b>										
BERTHOLD	Micro Moist	Mikrowellentransmission	2 Stk. a 143x250x111	2 Stk. a 1 kg	0 – 100	220 <sup>13)</sup>	-	max. 400	k. A.	31700.-
pro/M/tec		Mikrowellentransmission	2 Stk. a Ø126 x 49	2 Stk. a 1 kg	10 – 90	50 <sup>13)</sup>	-	max. 400	k. A.	15200.-
<b>Mikrowellenreflexionssysteme</b>										
ALKON	moisture probe	Mikrowellenreflexion	Ø75 x 600	7,7	0 – 100	60 <sup>13)</sup>	> 75	0	44	4500.-
Franz Ludwig	FL H <sub>2</sub> O	Mikrowellenreflexion	Ø75 x 170	1,4	0 – 100	9,6	> 60	0	44	4500.-

<sup>11)</sup> Abmessungen des Meßkopfes. Die dazugehörige Auswerteeinheit ist separat zu betrachten.

<sup>12)</sup> Im Systempreis (=Listenpreis laut Hersteller) sind ein Meßkopf und die notwendige Auswerteelektronik in einer Grundausstattung enthalten.

<sup>13)</sup> Gesamtleistungsbedarf von Sensor und Auswerteeinheit.

HYDRONIX	Hydro Mix	Mikrowellen-reflexion	Ø110 x 300	8	0 – 100	2,4	>100	0	94	4000.-
KELLER	Hygrowave ODR 2500	Mikrowellen-reflexion	Ø160 x 190	5	0 – 100	25 <sup>13)</sup>	k. A.	0	200	16250.-
FS&L Sensortech	Hygrowave ODR 2500	Mikrowellen-reflexion	Ø160 x 190	5	0 – 100	25 <sup>13)</sup>	k. A.	0	200	14200.-
Strandberg Engineering	Type 6711	Mikrowellen-reflexion	173x184x200	3,4	0-100	250 <sup>13)</sup>	150	0	k. A.	10000.-
TEWS Elektronik	MW 2160	Mikrowellen-reflexion	Ø140 x 94	3,5	0 – 70	30 <sup>13)</sup>	k. A.	0	50	19700.-
<b>Mikrowellentransmissionssysteme</b>										
BERTHOLD	Micro Moist	Mikrowellen-transmission	2 Stk. a 143x250x111	2 Stk. a 1 kg	0 – 100	220 <sup>13)</sup>	k. A.	max. 400	k. A.	31700.-
pro/M/tec		Mikrowellen-transmission	2 Stk. a Ø126 x 49	2 Stk. a 1 kg	10 – 90	50 <sup>13)</sup>	k. A.	max. 400	k. A.	15200.-
<b>Mikrowellenresonatorsysteme</b>										
MÜTEC	HUMY 2000	Mikrowellen-resonator	Ø140 x 52	0,5	0 – 85	115 <sup>13)</sup>	k. A.	0	44	11300.-
<b>Zeitbereichsreflektometrie – Systeme (TDR)</b>										
IMKO	TRIME-GW	Zeitber.-reflekt.	Ø80 x 225	1	5 – 40	4,5	>150	0	k.A.	3000.-
<b>NIT – Systeme</b>										
FOSS	Infra – Analyzer	NIT	420x605x420	35	0 – 100	125 <sup>13)</sup>	6 - 30	k. A.	k. A.	50000.-
<b>NIR-Systeme</b>										
Analyticon Instruments	DMA 300	NIR	330x175x205	9	0 – 90	0,1	-	400	28	k.A.
BRAN+ LUEBBE	InfraAlyzer 600	NIR	450x290x220	10	0 – 100	200 <sup>13)</sup>	-	200	11	50000.-
mawi therm	IR-M 1000	NIR	235x146x110	4	0 – 80	36 <sup>13)</sup>	-	300	25	13800.-
MESA Electronic	MM55	NIR	281x175x181	4	0 – 100	70 <sup>13)</sup>	-	210	5	26600.-
Perten Instruments	DA 7000	NIR	300x130x330	10	0 – 100	k. A.	-	120	4	57200.-
PIER ELECTRONIC	Reflection Photometer	NIR	300x125x201	8	0 – 90	60 <sup>13)</sup>	-	100	k. A.	9200.-
REMBE	NIROMM	NIR	Ø120 x 150	4	0 – 40	k. A.	-	100	k. A.	14000.-



Rütter	Quadra Beam 6600	NIR	162x280x142	4	0 – 95	90 <sup>13)</sup>	-	100	4	16900.-
SS&S	UR 5000	NIR	230x200x110	5	0 – 60	20	-	50	k. A.	8500.-
ZEISS	Corona	NIR	324x167x169	6,2	0 – 100	35	-	13	3	20000.-

### 10.1.3 Berechnungen für die schichtdickenabhängigen Versuche

Die eingesetzten Ringe besitzen einen Durchmesser von 200 mm und somit eine Bodenfläche von 31416 mm<sup>2</sup>.

Tabelle 30: Einwaagen für die schichtdickenabhängigen Versuche.

Ringhöhe [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Volumen [dm <sup>3</sup> ]	0,3142	0,6283	0,9425	1,2566	1,5708	1,8850	2,1991	2,5133	2,8274	3,1416
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	benötigte Masse [kg]									
<b>0,10</b>	0,0314	0,0628	0,0942	0,1257	0,1571	0,1885	0,2199	0,2513	0,2827	0,3142
<b>0,15</b>	0,0471	0,0942	0,1414	0,1885	0,2356	0,2827	0,3299	0,3770	0,4241	0,4712
<b>0,20</b>	0,0628	0,1257	0,1885	0,2513	0,3142	0,3770	0,4398	0,5027	0,5655	0,6283
<b>0,25</b>	0,0785	0,1571	0,2356	0,3142	0,3927	0,4712	0,5498	0,6283	0,7069	0,7854
<b>0,30</b>	0,0942	0,1885	0,2827	0,3770	0,4712	0,5655	0,6597	0,7540	0,8482	0,9425
<b>0,35</b>	0,1100	0,2199	0,3299	0,4398	0,5498	0,6597	0,7697	0,8796	0,9896	1,0996
<b>0,40</b>	0,1257	0,2513	0,3770	0,5027	0,6283	0,7540	0,8796	1,0053	1,1310	1,2566
<b>0,45</b>	0,1414	0,2827	0,4241	0,5655	0,7069	0,8482	0,9896	1,1310	1,2723	1,4137
<b>0,50</b>	0,1571	0,3142	0,4712	0,6283	0,7854	0,9425	1,0996	1,2566	1,4137	1,5708
<b>0,55</b>	0,1728	0,3456	0,5184	0,6912	0,8639	1,0367	1,2095	1,3823	1,5551	1,7279
<b>0,60</b>	0,1885	0,3770	0,5655	0,7540	0,9425	1,1310	1,3195	1,5080	1,6965	1,8850
<b>0,65</b>	0,2042	0,4084	0,6126	0,8168	1,0210	1,2252	1,4294	1,6336	1,8378	2,0420
<b>0,70</b>	0,2199	0,4398	0,6597	0,8796	1,0996	1,3195	1,5394	1,7593	1,9792	2,1991
<b>0,75</b>	0,2356	0,4712	0,7069	0,9425	1,1781	1,4137	1,6493	1,8850	2,1206	2,3562
<b>0,80</b>	0,2513	0,5027	0,7540	1,0053	1,2566	1,5080	1,7593	2,0106	2,2619	2,5133
<b>0,85</b>	0,2670	0,5341	0,8011	1,0681	1,3352	1,6022	1,8692	2,1363	2,4033	2,6704
<b>0,90</b>	0,2827	0,5655	0,8482	1,1310	1,4137	1,6965	1,9792	2,2619	2,5447	2,8274
<b>0,95</b>	0,2985	0,5969	0,8954	1,1938	1,4923	1,7907	2,0892	2,3876	2,6861	2,9845
<b>1,00</b>	0,3142	0,6283	0,9425	1,2566	1,5708	1,8850	2,1991	2,5133	2,8274	3,1416

### 10.1.4 Aufbereitung der Daten von den Feldversuchen

Die Datenaufbereitung soll am Beispiel eines Ausschnitts von Rohdaten der Lintronic FMS Sonde verdeutlicht werden.

Tabelle 31: Beispiel für die Meßdatenaufbereitung (Litronic FMS 1998).

Zeit [s]	Anhänger Nr.	Feuchte roh [V]	Gleitendes Mittel [V]	Kalibrierter Wert [%]	Datenreduktion auf 1 s
51,0	14	2,414	2,529	69,49	
51,2	14	2,414	2,383	65,22	
51,4	14	2,337	2,227	60,65	61,88
51,6	14	2,101	2,134	57,93	
51,8	14	1,869	2,071	56,10	
52,0			2,055	55,63	
52,2			2,040	55,85	
52,4			2,025	59,03	58,56
52,6		2,137	2,202	60,62	
52,8	14	2,414	2,262	61,69	
53,0	14	2,219	2,264	61,74	
53,2	14	2,285	2,288	62,45	
53,4	14	2,266	2,257	61,53	62,03
53,6	14	2,257	2,238	60,80	
53,8	14	2,257	2,219	59,83	

**Gleitendes Mittel über 5 Werte**

**Kalibrierung  $y=29,25x-4,48$**

**Datenreduktion auf 1 Sekunde**

Nachdem diese Rechenschritte abgelaufen sind, erfolgt die Berechnung der Gesamtfuchte der Ladung wie in Kapitel 4.7.2 beschrieben. Dieser Wert wird abschließend mit dem Referenzwert verglichen.

## 10.2 Anhang Ergebnisse

### 10.2.1 Einzelergebnisse Franz Ludwig H<sub>2</sub>O

Tabelle 32: Ergebnisse der Laborversuche mit Franz Ludwig H<sub>2</sub>O.

Versuchsreihe	Mais 1	Mais 2 <sup>14)</sup>	Mais 3
Datum	23.07.98	25.07.98	10.08.98
Anzahl Proben	20	54	10
Schichtdicke [mm]	10 - 40	60	60
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	0,3	nicht erfaßt	nicht erfaßt
Feuchte min. [%]	68,3	0,3	63,1
Feuchte max. [%]	71,6	66,8	71,1
Feuchtbereich [%]	3,3	66,5	8,0
<b>Kalibriereinstellungen (MQ-Wert)</b>			
0 % ≡	0,01	0,01	0,01
40 % ≡	1,45	40	1,45
80 % ≡	2,90	80	2,90
<b>Ergebnisse</b>			
mittlere Abweichung [%]	-10,9	-85,9	35,2
Standardabweichung [%]	23,6	20,4	18,0
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	-0,0388	0,7502	0,0148
<b>Neukalibrierung / Korrektur</b>			
Korrekturformel:	5,5485 · Schichtdicke <sup>-0,5062</sup>	32,013 · ln(MQ) + 38,202	5,8738 · ln(MQ) +62,903
<b>Ergebnisse nach Neukalibrierung / Korrektur</b>			
mittlere Abweichung [%]	0,87	221,7	0,1
Standardabweichung [%]	13,12	447,94	3,45
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	-0,0388	0,8489	0,1815

<sup>14)</sup> Die hohe mittlere Abweichung und Standardabweichung nach Anwendung der neuen Kalibrierformel liegen in der großen Anzahl der extrem trockenen Proben begründet.

## 10.2.2 Einzelergebnisse Strandberg Type 6711

Tabelle 33: Ergebnisse der Laborversuche mit Strandberg Type 6711.

Versuchsreihe	Mais 1	Mais 2	Mais 3	Gras 1	Gras 2	Hanf 1
Datum	28.08.97	09.09.97	10.09.97	02.09.97	03.09.97	15.09.97
Anzahl Proben	100	60	80	20	20	16
Schichtdicke [mm]	ca.115	ca.115	ca.115	ca.115	ca.115	ca.115
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	-	-
Feuchte min. [%]	58,0	19,0	25,6	78,3	69,5	46,5
Feuchte max. [%]	77,1	68,4	78,3	80,8	73,0	67,6
Feuchtebereich [%]	19,1	49,5	52,7	2,5	3,5	21,1
<b>Kalibriereinstellungen</b>						
Temp set point [°C]	30	30	20	30	30	20
Scale Lo	50	50	0	50	50	0
Scale Hi	150	150	10	150	150	100
Multiply factor	1,0	1,4	1,2	1,0	1,2	1,2
Calibrate Zero	798	798	798	798	798	798
Calibrate 100	2849	2849	2849	2849	2849	2849
<b>Ergebnisse</b>						
mittlere Abweichung [%]	-23,0	-2,2	-7,6	-51,7	-26,5	-36,0
Standardabweichung[%]	12,8	34,4	32,1	14,1	16,5	25,7
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,1837	0,7851	0,8007	0,0166	0,1177	0,6467
<b>Kalibriereinstellung neu</b>						
Korrekturformel	39,876 · $\varphi^{-0,8684}$	10,003 · $\varphi^{-0,5773}$	19,900 · $\varphi^{-0,7148}$	78,534 · $\varphi^{-0,9962}$	66,265 · $\varphi^{-0,9818}$	30,029 · $\varphi^{-0,8175}$
<b>Ergebnisse mit neuer Kalibriereinstellung</b>						
mittlere Abweichung [%]	0,1	1,3	-0,3	0	0	0,3
Standardabweichung[%]	5,6	18,0	10,9	1,0	1,1	8,6
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,1701	0,7851	0,8114	0,0151	0,1213	0,6196

### 10.2.3 Einzelergebnisse MESA MM55

Tabelle 34: Ergebnisse der Laborversuche 1997 mit dem MESA MM55 System.

Versuchsreihe	Mais 1		Mais 2		Mais 3	
Datum	18.08.97		27.08.97		01.09.97	
Anzahl Proben	17		30		20	
Feuchte min. [%]	60,4		60,3		65,5	
Feuchte max. [%]	68,1		78,5		77,1	
Feuchtebereich [%]	7,7		18,2		11,6	
	Kanal A	Kanal B	Kanal A	Kanal B	Kanal A	Kanal B
<b>Kalibriereinstellungen</b>						
Algorithmus	13	3	13	3	13	3
Span	14	14	14	14	40,30	14,44
Zero	7200	7200	7200	7200	7758	8861
Zero Range	0	0	0	0	-3	6
<b>Ergebnisse</b>						
mittlere Abweich. [%]	-41,9	-52,1	-43,4	-48,7	8,8	4,9
Standardabweich. [%]	1,13	1,96	2,15	3,78	6,96	2,42
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,648	0,519	0,911	0,978	0,134	0,921
<b>Kalibriereinstellungen neu</b>						
Algorithmus	13	3	13	3	13	3
Span neu	18,01	28,05	49,33	14,44	112,3	21,81
Zero neu	4746	6636	8804	8861	3385	457
Zero Range neu	4	-1	-3	6	-6	6
<b>Ergebnisse mit neuer Kalibriereinstellung</b>						
mittlere Abweich. [%]	0	0	0	0	0	0
Standardabweich. [%]	1,01	0,73	1,63	0,85	9,02	1,61
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,887	0,947	0,964	0,990	0,045	0,917

Tabelle 35: Ergebnisse der Laborversuche 1997 mit dem MESA MM55 System.

Versuchsreihe	Gras 1		Gras 2		Hanf 1	
Datum	02.09.97		25.07.97		10.08.97	
Anzahl Proben	20		20		8	
Feuchte min. [%]	78,3		69,5		63,5	
Feuchte max. [%]	80,8		73,0		64,4	
Feuchtebereich [%]	2,5		3,5		0,9	
	Kanal A	Kanal B	Kanal A	Kanal B	Kanal A	Kanal B
<b>Kalibriereinstellungen</b>						
Algorithmus	13	3	13	3	13	3
Span	39,33	14,44	26,59	11,23	26,59	11,23
Zero	8804	8861	2644	5348	2644	5348
Zero Range	-3	6	-1	9	-1	9
<b>Ergebnisse</b>						
mittlere Abweichung [%]	9,9	-17,4	-7,5	-15,9	27,7	4,6
Standardabweichung[%]	2,51	1,21	3,26	1,38	2,30	0,4
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,066	0,007	0,003	0,008	0,812	0,813

Tabelle 36: Ergebnisse der Laborversuche 1998 mit dem MESA MM55 System.

Versuchsreihe	Gras 3		Gras 4		Mais 4	
Datum	24.05.98		24.06.98		1998	
Anzahl Proben	28		38		64	
Feuchte min. [%]	53,1		1,3		5,1	
Feuchte max. [%]	82,6		65,8		83,6	
Feuchtebereich [%]	29,5		64,5		78,5	
	Kanal A	Kanal B	Kanal A	Kanal B	Kanal A	Kanal B
<b>Kalibriereinstellungen</b>						
Algorithmus	0	3	0	3	0	3
Span	24,56	30,82	24,56	30,82	24,56	30,82
Zero	74	3491	74	3491	74	3491
Zero Range	0	-1	0	-1	0	-1
<b>Ergebnisse</b>						
mittlere Abweich. [%]	-24,0	-47,0	-48,9	28,8	-32,2	-26,4
Standardabweich. [%]	14,78	13,48	94,02	129,58	5,22	8,52
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,842	0,840	0,842	0,840	0,935	0,783
<b>Kalibriereinstellungen neu</b>						
Algorithmus	0	3	0	3	0	3
Span neu	14,68	22,00	26,00	37,06	37,34	38,63
Zero neu	100	7697	4822,00	4830	9025	7896
Zero Range neu	0	4	0	-1	-1	-1
<b>Ergebnisse mit neuer Kalibriereinstellung</b>						
mittlere Abweich. [%]	0,1	0,1	8,1	76,8	0,3	4,1
Standardabweich. [%]	5,51	5,50	47,64	195,15	5,55	25,87
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,918	0,916	0,982	0,916	0,935	0,783



### 10.2.4 Einzelergebnisse Rütter Quadra Beam 6500

Tabelle 37: Ergebnisse des Rütter Quadra Beam 6500.

Versuchsreihe	Mais 1	Mais 2	Mais 3	Gras 1
Datum	11.08.97	13./14.08.97	02.09.97	02.09.97
Anzahl Proben	30	57	40	20
Schichtdicke [mm]	-	-	-	-
Dichte [kg/dm <sup>3</sup> ]	-	-	-	-
Feuchte min. [%]	12,3	64,3	63,2	78,3
Feuchte max. [%]	62,7	79,8	68,4	80,9
Feuchtebereich [%]	50,4	15,5	5,2	2,6
<b>Kalibriereinstellungen</b>				
Neigung	0,89	0,89	1,25	0,89
Y-Wert	4,79	4,79	-8,87	4,79
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	2,3	12,8	-0,8	-26,5
Standardabweichung [%]	25,11	2,81	2,05	1,50
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,841	0,863	0,661	0,019
<b>Kalibrierung mittels linearer Regression</b>				
Kalibrierfunktion	(16)	(17)	(18)	-
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	4,5	0,1	0,0	-
Standardabweichung [%]	27,75	2,28	1,38	-
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,841	0,836	0,661	-

$$\text{Kalibrierfunktionen: } \varphi = 0,9421 \cdot \varphi_0 + 3,5265 \quad (16)$$

$$\varphi = 0,7604 \cdot \varphi_0 + 10,2573 \quad (17)$$

$$\varphi = 0,5636 \cdot \varphi_0 + 29,0015 \quad (18)$$

### 10.2.5 Einzelergebnisse Litronic FMS System

Tabelle 38: Ergebnisse der Laborversuche 1997 mit dem Litronic FMS System.

Versuchsreihe	Mais 1	Mais 2	Mais 3	Hanf 1
Datum	31.07.97	02.09.97	08.09.97	15.09.97
Anzahl Proben	20	20	20	16
Feuchte min. [%]	57,6	65,3	58,0	42,8
Feuchte max. [%]	61,7	68,4	65,6	67,6
Feuchtebereich [%]	4,1	3,1	7,6	24,8
<b>Kalibriereinstellungen</b>				
P1	100 / 0	0 / 0	119 / 0	119 / 0
P2	1000 / 1680	500 / 1170	1642 / 3000	1642 / 3000
P3	3000 / 5400	1000 / 2340	3288 / 6240	3288 / 6240
P4	5000 / 9000	1500 / 3510	4688 / 9000	4688 / 9000
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	-13,6	-92,9	0,0	-57,8
Standardabweichung [%]	39,07	7,68	15,1	19,85
Bestimmtheitsmaß R <sup>2</sup>	0,723	0,0126	0,703	0,763

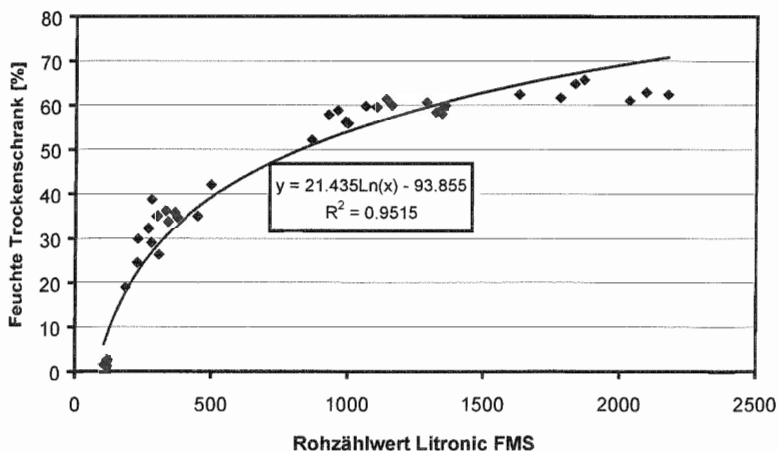


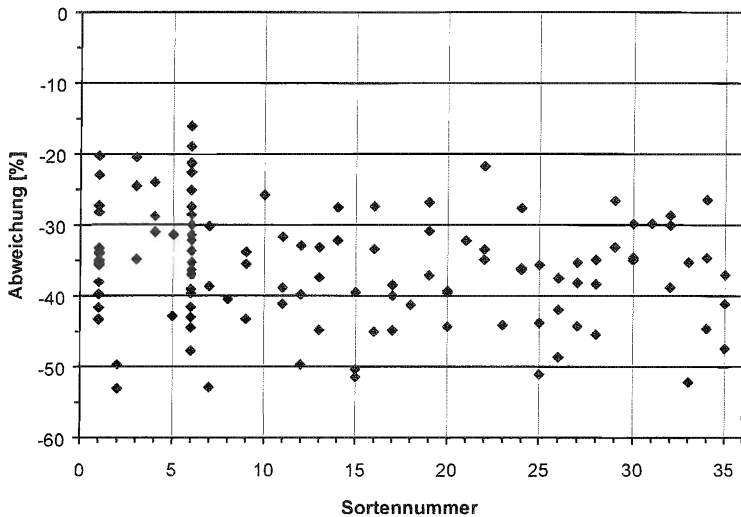
Abbildung 65: Logarithmischer Kalibrieransatz für das Litronic FMS System basierend auf der Versuchsreihe Mais 5 (n = 42).

Tabelle 39: Ergebnisse der Laborversuche 1998 mit dem Litronic FMS System.

Versuchsreihe	Mais 4	Mais 5	Mais 6	Gras 1
Datum	23.04.98	25.04.98	18.06.98	24.06.98
Anzahl Proben	30	42	20	21
Schichtdicke [mm]	30 und 50	30	10 – 40	30
Dichte [kg/dm³]	0,3	0,3	0,3	0,3
Feuchte min. [%]	70,3	1,3	68,3	56,0
Feuchte max. [%]	73,2	65,8	71,6	65,8
Feuchtebereich [%]	2,9	64,5	3,3	9,8
<b>Kalibriereinstellungen</b>				
P1	100 / 0	0 / 0	119 / 0	119 / 0
P2	1000 / 1680	500 / 1170	1642 / 3000	1642 / 3000
P3	3000 / 5400	1000 / 2340	3288 / 6240	3288 / 6240
P4	5000 / 9000	1500 / 3510	4688 / 9000	4688 / 9000
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]	-47,23	161,8	-10,6	-10,4
Standardabweichung [%]	8,26	409,2	23,16	5,53
Bestimmtheitsmaß R²	0,064	0,736	-	0,457
<b>Kalibriereinstellungen neu</b>				
P1		119 / 690	Berechnungs- formel: $\varphi = \varphi_0 \cdot 5,3508 \cdot L^{-0,497}$	119 / 5383
P2		526 / 5512		1642 / 6258
P3		2000 / 6338		3288 / 7412
P4		5000 / 8018		4688 / 8308
<b>Ergebnisse</b>				
mittlere Abweichung [%]		38,5	1,2	0,1
Standardabweichung [%]		103,53	10,11	3,18
Bestimmtheitsmaß R²		0,955	0,023	0,457

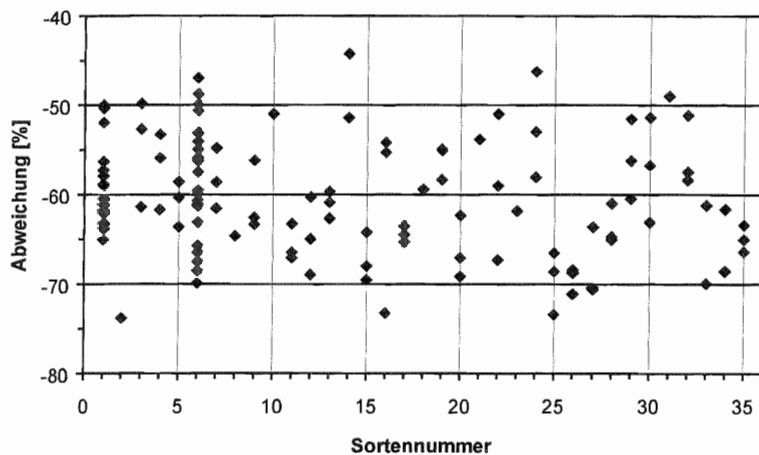
### 10.2.6 Überprüfung der Sortenunabhängigkeit

Durch die Zusammenarbeit mit dem Saatguthersteller KWS ist es möglich, im Erntejahr 1998 35 unterschiedliche Maissorten zu häckseln. Die daraus resultierenden Ergebnisse zeigen, daß die Meßergebnisse des MESA MM55 und die Ergebnisse des Litronic FMS nicht von der Sorte beeinflusst werden (Abbildung 66, Abbildung 67). Dadurch kann sichergestellt werden, daß nur eine Feuchtekalisierung für Mais notwendig ist.



1 Achat	8 Etendard	15 Gamma	22 Lenz	29 Romario
2 Arsenal	9 Fanion	16 Harpun	23 Loft	30 Santiago
3 Attribut	10 Fernando	17 Helix	24 Major	31 Speedy
4 Banguy	11 Fjord	18 Husar	25 Mondeo	32 Sponsor
5 Caballero	12 Florett	19 Ilias	26 Olivin	33 Symphony
6 Carrera	13 Fuego	20 KX 7151	27 Pedro	34 Toledo
7 Dictus	14 Galice	21 KX 7173	28 Prinz	35 Türkis

Abbildung 66: Genauigkeit des MESA MM55 1998 sortiert nach Sorten.



1 Achat	8 Etendard	15 Gamma	22 Lenz	29 Romario
2 Arsenal	9 Fanion	16 Harpun	23 Loft	30 Santiago
3 Attribut	10 Fernando	17 Helix	24 Major	31 Speedy
4 Banguy	11 Fjord	18 Husar	25 Mondeo	32 Sponsor
5 Caballero	12 Florett	19 Ilias	26 Olivin	33 Symphony
6 Carrera	13 Fuego	20 KX 7151	27 Pedro	34 Toledo
7 Dictus	14 Galice	21 KX 7173	28 Prinz	35 Türkis

Abbildung 67: Genauigkeit des Litronic FMS 1998 nach Sorten.

### 10.3 Darstellung der Informationen in Ertragskarten

Die folgenden Abbildungen zeigen die Frischmasse-Ertragskarte und die Trockenmasse-Ertragskarte von der Maisernte 1998 in Holzheim. Während die Frischmasse-Ertragskarte den Schluß nahelegt, daß sich eine ausgeprägte Niedrigertragszone im nordwestlichen Teil des Schlages befindet, zeigt die Trockenmasse-Ertragskarte, daß das gesamte Feld eine ziemlich einheitliche Ertragsstruktur besitzt (Abbildung 69).

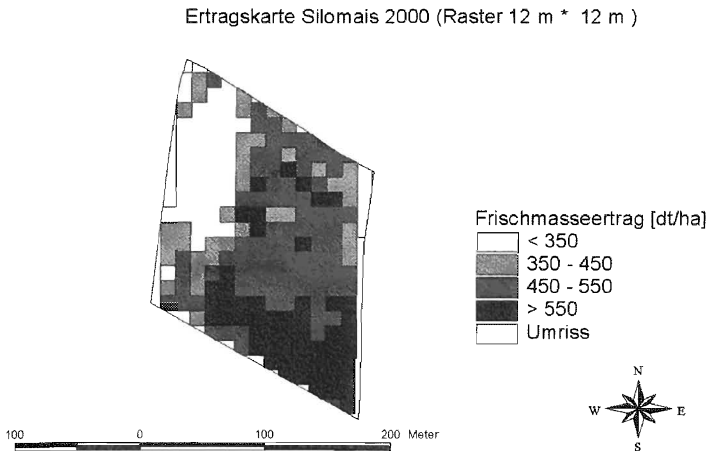


Abbildung 68: Frishmasse-Ertragskarte der Silomaisernte 1998 in Holzheim.

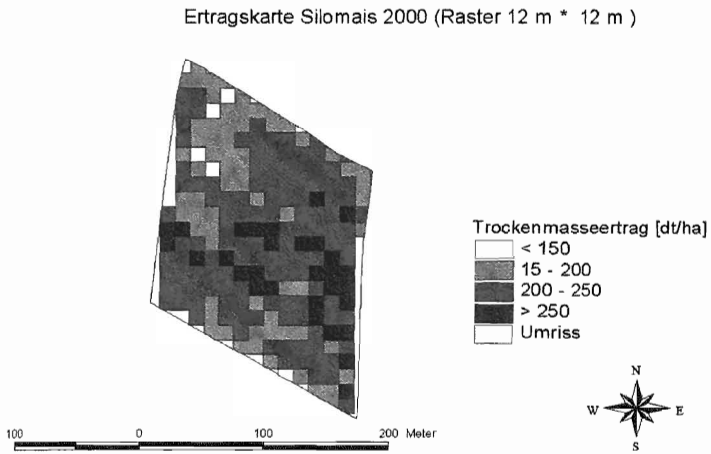


Abbildung 69: Trockenmasse-Ertragskarte der Silomaisernte 1998 in Holzheim.