

Institut für Landtechnik der
Technischen Universität München
in Weihenstephan

Satellitengestützte Arbeitszeiterfassung und Ertragsermittlung in Rundballenpressen

von

Karl Wild

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. (AE Keszthely) J. Schön
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. H. Auernhammer
2. Univ.-Prof. Dr. L. Reiner
3. Assoc. Prof. J. K. Schueller, Ph.D., University of Florida,
Gainesville / USA

Die Dissertation wurde am 12.03.1998 bei der
Technischen Universität München eingereicht und durch die
Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau am 05.05.1998 angenommen.

© 1998 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:
Institut für Landtechnik Weihenstephan
Vöttinger Straße 36
85350 Freising

Druck und Einband: Hieronymus Buchreproduktions GmbH, München

Meiner Frau Annette und meinen Eltern

Nach Abschluß der vorliegenden Arbeit danke ich allen, die zum Gelingen der Dissertation beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr. H. Auernhammer für die Überlassung des Themas, für die Gesamtbetreuung dieser Arbeit und für die wertvollen Hinweise bei der Abfassung der Dissertation. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr. L. Reiner und Prof. Dr. J. K. Schueller für die Übernahme der Koreferate und Herrn Univ.-Prof. Dr. Dr. h.c. (AE) J. Schön für den Prüfungsvorsitz. Außerdem gebührt Herrn Prof. Dr. J. K. Schueller und Herrn Prof. Dr. W. Chancellor großer Dank für die wertvollen Anregungen zur Durchführung der Arbeit und die großzügige Unterstützung.

Ganz herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern der Landtechnik Weihenstephan und den studentischen Hilfskräften, die mir behilflich waren. Persönlich möchte ich dabei Herrn H. Keller, Herrn M. Berchtold, Herrn F. Bauer, Herrn J. Dallinger, Frau G. Schneider, Frau B. Spieß und Herrn M. Mittermeier nennen. Herrn Dr. H. Stanzel und Herrn PD Dr. Dr. habil. G. Englert danke ich für ihre kritischen Stellungnahmen.

Bedanken möchte ich mich auch bei Familie Rottmeier, Neuhausen/Erding, insbesondere bei Herrn Dr. J. Rottmeier. Auf ihrem Betrieb konnte ich meine Untersuchungen durchführen und erhielt dabei sehr große Unterstützung.

Dank gilt ferner dem Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Teilfinanzierung des Projekts und der Konrad-Adenauer-Stiftung (Institut für Begabtenförderung) für die Promotionsförderung.

Weihenstephan, im Mai 1998

Karl Wild

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
Symbole und Abkürzungen	XIX
<u>1</u> Einleitung	1
1.1 Hinführung	1
1.2 Problemstellung	3
<u>2</u> Stand des Wissens	5
2.1 Positionsermittlung und Georeferenzierung	5
2.1.1 Ortungsmöglichkeiten für Fahrzeuge	5
2.1.1.1 Fahrzeugautonome Sensorsysteme	6
2.1.1.2 Sender-/Empfängersysteme	7
2.1.2 Satellitenortungs- und Navigationssysteme	8
2.1.2.1 Aufbau und Konfiguration des GPS	9
2.1.2.2 GPS-Signal und Verfahren der Ortung mit GPS	10
2.1.3 Eigenschaften des GPS und Ortungsgenauigkeit	14
2.1.4 Einsatz des GPS in der Landwirtschaft	15
2.1.5 Georeferenzierung	18
2.2 Arbeitszeiterfassung	19
2.2.1 Gliederung der Arbeit in Abschnitte und Arbeitsarten	19
2.2.2 Zeiterhebungsmethoden	21
2.2.3 Erfassungstechniken	23
2.2.3.1 Erfassungstechniken bei der finalen Analyse	23
2.2.3.2 Erfassungstechniken bei der kausalen Analyse	25
2.3 Ertragsermittlung	29
2.3.1 Verfahren der Mengenermittlung	29
2.3.2 Gewichtsermittlung in der Landwirtschaft	31
2.3.2.1 Formen der stationären Gewichtsermittlung	31
2.3.2.2 Technische Grundlagen der mobilen Gewichtsermittlung	32
2.3.2.3 Formen der mobilen Gewichtsermittlung	35
2.3.3 Dynamische Gewichtsermittlung	38
2.3.3.1 Verfahren zur dynamischen Wägung	38
2.3.3.2 Untersuchte Einflußgrößen bei der dynamischen Wägung	39
2.3.3.3 Störgrößenkompensation	40
2.3.4 Lokale Ertragsermittlung und -kartierung	42
<u>3</u> Zielsetzung	45

4	Positionsermittlung	47
4.1	GPS als Basis für die automatisierte Prozeßdatenermittlung	47
4.1.1	GPS zur zeitlichen Zuordnung von erfaßten Daten	47
4.1.2	Methodik und Versuchsdurchführung	48
4.1.2.1	Ortungstechnik	48
4.1.2.2	Versuchsdurchführung	51
4.2	Datenweiterverarbeitung und -analyse	53
4.3	Ergebnisse	55
4.3.1	Verfügbarkeit und Kontinuität des GPS zur Positions- und Zeitermittlung	56
4.3.1.1	Verfügbarkeit an den Aufzeichnungstagen	56
4.3.1.2	Zeitspanne zwischen Einschalten des Empfängers und erster Positionsausgabe	56
4.3.1.3	Anzahl erfaßter Satelliten	57
4.3.1.4	Kontinuität	59
4.3.1.5	Zeitermittlung	62
4.3.2	Genauigkeit der Positionsermittlung mit GPS	62
4.3.2.1	Position Dilution of Precision (PDOP)	62
4.3.2.2	Streuung der Fahrspuren im Zeitraum von sechs Monaten	64
4.3.2.3	Ursachen der Fahrspurstreuung	67
4.3.2.4	Empfängereinfluß auf die Ortungsgenauigkeit	69
4.3.2.5	Einfluß der Post Processing-Software auf die Ortungsgenauigkeit	73
4.4	Diskussion	74
4.4.1	GPS zur Zeitermittlung	74
4.4.2	GPS-Verfügbarkeit und Kontinuität bei der Positionsermittlung	75
4.4.3	Genauigkeit der Positionsermittlung	77
5	Arbeitszeiterfassung	81
5.1	Methodenerweiterung und Versuchsdurchführung	81
5.1.1	Festlegung der zu erfassenden Arbeitsabschnitte und Einflußgrößen	81
5.1.2	Meßgrößen, Sensorikergänzung und Datenerfassungstechnik	83
5.1.3	Datenerfassungssoftware	85
5.1.4	Versuchsdurchführung und Referenzmessungen	85
5.2	Entwicklung des Programms SATAZA zur automatisierten Arbeitszeitdatenanalyse	86
5.2.1	Anforderungen an den Prototypen	86
5.2.2	Auswahl des Betriebssystems und der Programmiersprache	87
5.2.3	Analysealgorithmen zur Identifizierung der Arbeitselemente	90
5.2.4	Ermittlung der Zeiten für die Arbeitsarten	94
5.2.5	Bestimmung der Einflußgrößen auf die Arbeitszeit	95
5.2.6	Einbindung der Analysealgorithmen und Ablauf der automatischen Analyse	95

5.2.7	Programmablauf am Personal-Computer	98
5.3	Ergebnisse	107
5.3.1	Sensorik und Erfassungssystem	107
5.3.2	Manuelle Analyse mit <i>SATAZA</i>	109
5.3.3	Automatisierte Analyse mit <i>SATAZA</i>	112
5.3.4	Einflußgrößen auf die Arbeitszeit	116
5.4	Diskussion	119
5.4.1	Sensorik und Erfassungssystem	119
5.4.2	Manuelle Arbeitszeitanalyse mit <i>SATAZA</i>	120
5.4.3	Automatisierte Arbeitszeitanalyse mit <i>SATAZA</i>	122
5.4.4	Einflußfaktoren auf die Arbeitszeit	124
6	Ertragsermittlung	127
6.1	Methodik und Versuchsdurchführung	127
6.1.1	Auswahl der zu untersuchenden Einflußfaktoren bei der dynamischen Wägung	127
6.1.1.1	Beschleunigungsbedingte Einflüsse	127
6.1.1.2	Schwingungsfreie Einflüsse	130
6.1.2	Versuchsfahrzeuge	132
6.1.3	Sensorik und Meßwerterfassung	133
6.1.4	Versuchsanlage und Versuchsdurchführung	136
6.1.4.1	Messung der Einflußfaktoren und der Wägegenauigkeit	136
6.1.4.2	Feldversuche mit dem Lückenschwad	140
6.2	Datenanalyse	141
6.3	Ergebnisse und Diskussion	142
6.3.1	Schwingungsfreie Einflüsse	142
6.3.1.1	Einfluß der Verlagerung der Zugöse im Zugmaul entlang der Fahrzeuginnenachse	142
6.3.1.2	Einfluß der Zugkraft an der Deichsel	143
6.3.1.3	Einfluß des Winkels zwischen den Fahrzeuginnenachsen	145
6.3.1.4	Einfluß der Auflage der Reifen auf dem Boden	145
6.3.1.5	Einfluß des Steigungswinkels der Reifenauflagefläche	147
6.3.1.6	Einfluß der Pick-up-Abstützung auf dem Boden	148
6.3.1.7	Schwingungsfreie Einflüsse der Fahrbahn	148
6.3.1.8	Diskussion	150
6.3.2	Einflüsse der Schwingungen	154
6.3.2.1	Charakterisierung der Gewichtssignale	154
6.3.2.2	Filter- und Glättungsverfahren	158
6.3.2.3	Gewichts- und Beschleunigungswerte	161
6.3.2.4	Diskussion	169
6.3.3	Genauigkeit der dynamischen Gewichts- und Durchsatzermittlung	173

6.3.3.1	Wägefehler beim Lückenschwad	173
6.3.3.2	Genauigkeit des Durchsatzes	176
6.3.3.3	Diskussion	179
6.4	Lokale Ertragsermittlung	182
6.4.1	Methodik und Datenanalyse	182
6.4.1.1	Versuchsdurchführung	182
6.4.1.2	Berechnung der lokalen Erträge	182
6.4.1.3	Ertragskartenerstellung	184
6.4.2	Ergebnisse	185
6.4.2.1	Statische Gewichtsermittlung	185
6.4.2.2	Dynamische Gewichtsermittlung	185
6.4.2.3	Bezugsflächen und -breite	188
6.4.2.4	Fahrgeschwindigkeiten	189
6.4.2.5	Durchsätze und lokale Ertragswerte	189
6.4.2.6	Ertragskarte	190
6.4.3	Diskussion	191
7	<u>Verfahrenstechnische Einordnung der Ergebnisse und</u>	
	<u>Schlußfolgerungen</u>	197
7.1	Elektrisches/Elektronisches Erfassungssystem	197
7.2	Ortung mit GPS	198
7.3	Arbeitszeiterfassung	202
7.4	Ertragsermittlung	203
8	<u>Zusammenfassung</u>	207
9	<u>Summary</u>	211
10	<u>Literatur</u>	215

Abbildungsverzeichnis

Nr.	Seite
1	2
2	6
3	9
4	13
5	14
6	16
7	20
8	20
9	24
10	26
11	27
12	31
13	35
14	38
15	43
16	50
17	57
18	58
19	60
20	61
21	63
22	64

23	Fahrspuren des Schleppers von der Hofstelle zum Schlag im Zeitraum vom 23.8.1994 - 13.11.1994 auf der Strecke Neuhausen-Flanning (65 Fahrten erfaßt mit FURUNO GN-72).	66
24	Fahrspuren des Schleppers vom Schlag zur Hofstelle im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 auf der Strecke Flanning-Neuhausen (130 Fahrten erfaßt mit FURUNO GN-72).	67
25	Fahrspuren des Schleppers vom Schlag zur Hofstelle im Zeitraum vom 23.8.1994 - 13.11.1994 auf der Strecke Flanning-Neuhausen (65 Fahrten ermittelt mit FURUNO GN-72).	68
26	Fahrspur des Schleppers von der Hofstelle zum Schlag und zurück auf der Strecke Flanning-Neuhausen am 17.5.1994 (Empfänger: FURUNO GN-72).	69
27	Fahrspur des Schleppers beim Rundballenpressen auf der Grafwiese und Schwadverlauf am 29.6.1995 (Empfänger: FURUNO GN-72).	70
28	Fahrspur des Schleppers beim Rundballenpressen auf der Grafwiese und Schwadverlauf am 29.6.1995 (Empfänger: ASHTECH M XII).	71
29	Fahrspur des Schleppers beim Rundballenpressen am 21.9.1993 auf der Angerwiese (Empfänger: ASHTECH M XII, Post Processing-Software: PPDIFF 4.5.00 und PPDIFF-NAV 2.1.04P).	73
30	Meßgrößen an der Rundballenpresse und am Schlepper bei der automatisierten Arbeitszeiterfassung.	83
31	Sensorik und Datenaufzeichnungstechnik für Schlepper und Rundballenpresse zur automatisierten Arbeitszeiterfassung.	84
32	Ermittlung der Hauptabschnitte in der Meßwertedatei.	96
33	Ermittlung der Arbeits-/Prozeßelemente bei einem Ballen in vier verschiedenen Ablaufsequenzen.	97
34	Programmablauf in <i>SATAZA</i>	99
35	Ergebnisdarstellung in <i>SATAZA</i> nach Abschluß der Analyse.	100
36	Graphische Ausgabe des Fahrweges mit Arbeits-/Prozeßelementlegende.	101
37	Tabellarische Ergebnisausgabe ("Log-Datei") durch <i>SATAZA</i>	102
38	Tabellarische Ergebnisausgabe ("Ergebnis-Datei") durch <i>SATAZA</i>	103
39	Tabellarische Ergebnisausgabe ("Ballenspezifische Datei") durch <i>SATAZA</i>	104
40	Analysen-Viewer von <i>SATAZA</i>	105
41	Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten bei der Gutaufnahme (manuelle Analyse mit <i>SATAZA</i> , Grafwiese, 29.6.1995).	111
42	Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Binden (manuelle Analyse mit <i>SATAZA</i> , Grafwiese, 29.6.1995).	111
43	Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Wenden (manuelle Analyse mit <i>SATAZA</i> , Grafwiese, 29.6.1995).	112
44	Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten bei der Gutaufnahme (automatisierte Analyse mit <i>SATAZA</i> , Grafwiese, 29.6.1995).	114

45	Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Binden (automatisierte Analyse mit <i>SATAZA</i> , Grafwiese, 29.6.1995).	115
46	Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Wenden (automatisierte Analyse mit <i>SATAZA</i> , Grafwiese, 29.6.1995).	116
47	Abweichungen der ermittelten Schwadlängen von den Referenzwerten bei der Schwadlängenmessung mit <i>ASHTECH M XII</i> und Radumdrehungszählung mit Reedschalter (Grafwiese, 29.6.1995).	117
48	Schwingungsersatzsystem für eine Rundballenpresse mit Freiheitsgraden.	128
49	Sensorsysteme zur Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse.	133
50	Applikationsorte der Beschleunigungssensoren in der Rundballenpresse.	135
51	Meßtechnik zur Gewichts- und Schwingungsmessung in der Rundballenpresse.	135
52	Versuchsanlage zur Ermittlung des Einflusses der Reifenauflagefläche bei der Gewichtsermittlung mit DMS am Achsstummel.	138
53	Versuchsanlage zur Teilsimulation einer Rollwiderstandsänderung mit einer variablen Rampe.	139
54	Versuchsanlage zur Ermittlung des Zugkrafteinflusses bei der Gewichtsermittlung mit DMS.	139
55	Lückenschwad zur Ermittlung der Genauigkeit bei der dynamischen Wägung.	141
56	Veränderung der Gewichtswerte nach Hineinschieben der Zugöse ins Zugmaul bei unterschiedlichen Verfahren der Gewichtsermittlung (\bar{x} bei $n=4$).	143
57	Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Zugkraft an der Deichsel (Scherspannungsmessung in Deichsel und im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).	144
58	Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Zugkraft an der Deichsel (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).	145
59	Gewichtssignale in Abhängigkeit vom Winkel zwischen den Fahrzeuglängsachsen von Schlepper und Presse (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; \bar{x} bei $n=4$).	146
60	Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Auflagefläche des Reifens auf dem Boden (Verringerung von innen nach außen; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).	146
61	Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Auflagefläche des Reifens auf dem Boden (Verringerung von außen nach innen; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).	147
62	Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Steigung der Reifenauflagefläche (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).	148
63	Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Pick-up-Abstützung über die Stützräder (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).	149

64	Gewichtsabweichungen vom Sollwert bei Messungen auf der Asphaltteststrecke (Messung bei Fahrzeugstillstand nach jeweils ca. 4 m Fahrt; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung in Achsstummeln; $n=1$).	149
65	Gewichtsabweichungen vom Sollwert bei Messungen auf der Wiesenteststrecke (Messung bei Fahrzeugstillstand nach jeweils ca. 4 m Fahrt; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung in Achsstummeln; $n=1$).	150
66	Gesamtgewichtssignal beim Pressen eines Ballens (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel).	155
67	Gewichtssignal gemessen an der Anhängerkupplung und am rechten Achsstummel beim Pressen eines Ballens.	156
68	Frequenzspektrum des an der Anhängerkupplung gemessenen Gewichtssignals bei unterschiedlichen Betriebsparametern.	157
69	Frequenzspektrum des am rechten Achsstummel gemessenen Gewichtssignals bei unterschiedlichen Betriebsparametern.	159
70	Gesamtssignal tiefpaßgefiltert und mit Spline geglättet (Fahrzeugstillstand, Motordrehzahl 40 Hz, Zapfwelldrehzahl 10 Hz, $f_g=0,1$ Hz, $WF=0,005$).	161
71	Roh- und geglättetes Gesamtgewichtssignal (Geschwindigkeit 6,2 km/h, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 9 Hz, Tiefpaßfilterung mit $f_g=0,1$ Hz, Spline mit $WF=0,005$, Gleitender Mittelwert mit $n=1000$ Werten).	162
72	Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals an der Anhängerkupplung und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Fahrzeugstillstand, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 9 Hz).	163
73	Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals an der Anhängerkupplung und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Geschwindigkeit 6,2 km/h, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).	163
74	Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals an der Anhängerkupplung und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Geschwindigkeit 6,2 km/h, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 9 Hz).	164
75	Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals (Scherspannungsmessung) und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Fahrzeug: Unimog, Geschwindigkeit 6,5 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 8 Hz).	165
76	Frequenzspektrum des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).	165
77	Verlauf des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).	166
78	Frequenzspektrum des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P4 (Geschwindigkeit 8,1 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).	167
79	Verlauf des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P4 (Geschwindigkeit 8,1 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).	168

80	Frequenzspektrum des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwellendrehzahl 8 Hz).	168
81	Verlauf des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwellendrehzahl 8 Hz).	169
82	Verlauf des Gesamtgewichtssignals beim Pressen eines Ballens (Anwelkgut, Schwad mit 3 m langen Lücken nach jeweils 7 m).	174
83	Tiefpaßfilterung und Spline-Glättung des Gewichtssignals sowie tatsächliches Ballengewicht (Grenzfrequenz $f_g=0,1$ Hz, Wichtungsfaktor $WF=0,01$).	175
84	Abweichungen des tiefpaßgefilterten Signals vom tatsächlichen Gewicht in den Schwadlücken.	175
85	Abweichungen der Spline-Kurve vom tatsächlichen Gewicht in den Schwadlücken.	176
86	Ermittelte Durchsätze beim Pressen des Lückenschwades (Differenzierung der tiefpaßgefilterten Gewichtssignale und der Spline-Kurve).	177
87	Auf Spline-Kurve basierende und tatsächliche Durchsätze beim Lückenschwad.	178
88	Abweichungen der über Tiefpaßfilterung und Spline-Glättung berechneten Durchsätze von den tatsächlichen bei Aufteilung des Lückenschwades in 1, 2, 4 und 8 Abschnitte.	179
89	Absolute Abweichungen des ermittelten vom tatsächlichen Ballengewicht (Grafwiese, 29.6.1995, Wägung statisch).	186
90	Absolute Abweichungen des ermittelten vom tatsächlichen Ballengewicht (Grafwiese, 29.6.1995, Wägung dynamisch).	186
91	Relative Abweichungen des ermittelten vom tatsächlichen Ballengewicht (Grafwiese, 29.6.1995, Wägung dynamisch).	187
92	Durchsatzbezugsflächen der Grafwiese für die lokale Ertragskartierung (29.6.1995).	188
93	Häufigkeitsverteilung der lokalen Heuerträge (Grafwiese, 29.6.1995, 1. Schnitt).	189
94	Rasterertragskarte für die Grafwiese (1,5 ha, Heu, 1. Schnitt, 29.6.1995).	190
95	Isoertragslinienkarte für die Grafwiese (1,5 ha, Heu, 1. Schnitt, 29.6.1995).	191

Tabellenverzeichnis

Nr.	Seite	
1	Arbeitsproduktivität landwirtschaftlicher Vollerwerbsbetriebe nach Betriebsformen dargestellt in Form des Jahresbetriebseinkommens (in DM/AK für das Wirtschaftsjahr 1994/95).	1
2	Fehlerursachen und deren typische Ausmaße bei der Ortung mit GPS und DGPS.	12
3	Systemanforderungen der Landwirtschaft an ein Satellitenortungs- und Navigationssystem.	16
4	Anfangs- und Endpunkte zur Abschnittsabgrenzung beim Rundballenpressen.	22
5	Gewichtssensoren und Sensorsysteme auf DMS-Basis.	34
6	Festgestellte Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse (95 % Vertrauensbereich bei vier Durchgängen, konstante Auflagepunkte).	37
7	Kenndaten der verwendeten GPS-Empfängersysteme.	49
8	Format einer GPS-Datenzeile des FURUNO-Empfängers.	53
9	Format eines korrigierten Datensatzes des ASHTECH-Empfängers.	54
10	Durchschnittliche Anzahl erfaßter Satelliten beim täglichen Eingrasen an 130 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (ohne Akquisitionsphase; Empfänger: FURUNO GN-72).	59
11	Zeitanteile der Ortungsausfälle, Ortung mit GPS und DGPS beim täglichen Eingrasen an 129 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (ohne Akquisitionsphase; Empfänger: FURUNO GN-72).	60
12	Durchschnittlicher PDOP beim täglichen Eingrasen an 130 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (ohne Akquisitionsphase; Empfänger: FURUNO GN-72).	62
13	Anzahl erfaßter Satelliten und PDOP-Werte beim Einsatz der Rundballenpresse am 29.6.1995 auf der Grafwiese einschließlich Hin- und Rückfahrt.	72
14	Anfangs- und Endpunkte zur Abschnittsabgrenzung beim Rundballenpressen.	82
15	Mit SATAZA (manuelle Analyse) ermittelte Arbeitszeiten für den Einsatz der Rundballenpresse auf der Grafwiese am 29.6.1995.	109
16	Differenzen zwischen den Ergebnissen der manuellen Analyse mit SATAZA und den Referenzzeiten (Grafwiese, 29.6.1995).	110
17	Differenzen zwischen den Ergebnissen der automatisierten Analyse mit SATAZA und den Referenzzeiten (Grafwiese, 29.6.1995).	113
18	Mit SATAZA ermittelte Geschwindigkeiten beim Rundballenpressen auf der Grafwiese am 29.6.1995.	118
19	Kennwerte der Versuchsmaschine und eingesetzten Fahrzeuge.	132
20	Wichtige Eigenschaften der gemessenen Gewichtssignale an der Anhängerkuppelung und den Achsstummeln.	158

21	Absolute Abweichungen vom tatsächlichen Ballengewicht bei der dynamischen Gewichtsermittlung (eingeteilt in Fehlerklassen, Grafwiese, 29.6.1995).	187
22	Relative Abweichungen vom tatsächlichen Ballengewicht bei der dynamischen Gewichtsermittlung (eingeteilt in Fehlerklassen, Grafwiese, 29.6.1995).	188
23	Absolute Abweichungen vom tatsächlichen Ballengewicht bei der statischen Gewichtsermittlung (eingeteilt in Fehlerklassen, Grafwiese, 29.6.1995).	192
24	Kalkulierter Verkaufspreis für ein integriertes Wägesystem in einer Rundballenpresse.	205

Symbole und Abkürzungen

α	Signifikanzniveau
A-S	Anti-Spoofing (Täuschungsabwehr)
AK	Arbeitskraft
AP	Arbeitsperson
β	Steigungswinkel
b	Bezugsflächenbreite
B	Bestimmtheitsmaß
C/A-Code	Coarse/Acquisition-Code (Groberfassungcode)
cm	Zentimeter
cmin	Zentiminuten
DGPS	Differential Global Positioning System
DMS	Dehnungsmeßstreifen
f_g	Grenzfrequenz
F_z	Zugkraft
F_{GA}	Gewichtskraft
FFT	Fast-Fourier-Transformation
g	Erdbeschleunigung (9,81 m/s ²)
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
h	Stunde
ha	Hektar
Hz	Hertz
k.A.	keine Angabe
kg	Kilogramm
km	Kilometer
L_1	1. Übertragungsfrequenz bei GPS
L_2	2. Übertragungsfrequenz bei GPS
LBS	Landwirtschaftliches Bus-System
LISL	Landwirtschaftliches Informations-System Landtechnik
m	Masse
m	Meter
MB	Megabyte
mg	10 ⁻³ g
min	Minuten
mm	Millimeter
mV	Millivolt
\dot{m}	Durchsatz
MEZ	Mitteuropäische Zeit
n	Anzahl an Wiederholungen
OOP	Objektorientierte Programmierung
p	Irrtumswahrscheinlichkeit
P-Code	Precise Code (Präzisionscode)

PDOP	Position Dilution of Precision (Genauigkeitsverwässerung der Position)
PPS	Precise Positioning Service (Präzisions-Positionierungsdienst)
s	Sekunde
s	Standardabweichung
S/A	Selective Availability (eingeschränkte Verfügbarkeit)
SPS	Standard Positioning Service (Standard-Positionierungsdienst)
Σ	Summe
t	Tonne
t	Zeit
UTC	Universal Time Coordinated (koordinierte Weltzeit)
UTM	Universales Transversales Mercator-System
v	Fahrgeschwindigkeit
V	Volt
W	Gewicht
WF	Wichtungsfaktor
WGS 84	World Geodetic System 1984
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert

1 Einleitung

1.1 Hinführung

Der Gewinn eines landwirtschaftlichen Betriebs ergibt sich aus der Differenz zwischen dem erbrachten Aufwand und dem erzielten Ertrag. Um bei drastisch gesunkenen Erzeugerpreisen auch zukünftig Gewinne erwirtschaften zu können, muß der Betrieb insbesondere auf der Aufwandsseite Optimierungen vornehmen. Durch einen effizienteren Einsatz der Produktionsmittel kann zur Erzielung eines bestimmten Ertrages der Aufwand gesenkt oder bei gleichbleibendem Aufwand der Ertrag gesteigert werden. Dabei ergibt sich durch Anwendung der ersten Strategie die Chance für eine stärker umweltorientierte Produktion.

Auf der **Aufwandsseite** hat der Faktor **Arbeit** einen sehr großen Stellenwert. Seine Bedeutung hat in den letzten Jahren zugenommen, da die Arbeitskraft in vielen Bereichen zu einem der kostenintensivsten Produktionsfaktoren wurde. Ein Vergleich zeigt, daß die Arbeitsproduktivität in der Landwirtschaft gegenüber den übrigen Wirtschaftsbereichen niedriger ist [48] und bei den einzelnen landwirtschaftlichen Betriebsformen sehr unterschiedlich ausfällt; Schlußlicht bilden die Futterbau- und Dauerkulturbetriebe (Tab. 1).

Tabelle 1: Arbeitsproduktivität landwirtschaftlicher Vollerwerbsbetriebe nach Betriebsformen dargestellt in Form des Jahresbetriebseinkommens (in DM/AK für das Wirtschaftsjahr 1994/95, nach [49]).

Marktfruchtbau	Futterbau	Veredelung	Dauerkultur	Gemischt
90.226	60.779	86.688	44.220	69.607

Zur Steigerung der Produktivität bzw. zur Senkung der Arbeitskosten müssen Problemstellen in den Produktionsverfahren erkannt und neue Verfahren in Erwägung gezogen werden [124]. Dazu sind Informationen über den Arbeitszeitaufwand und -bedarf erforderlich: Für die Arbeitszeitkontrolle und für die Organisation der Arbeit werden Zahlen über den Arbeitszeitaufwand benötigt; Investitionsentscheidungen, Betriebsplanungen und Arbeitsverfahrensvergleiche verlangen darüberhinaus Wissen über den Arbeitszeitbedarf [83].

Eine Produktivitätserhöhung setzt in der Regel auch auf der **Ertragsseite** Analysen voraus. Kenntnisse über die **Mengen der geernteten Produkte** sind hierzu erforderlich. Exakte

Zahlen über erzielte Naturalerträge gehen in Deckungsbeitragsrechnungen und in Kostenermittlungen für eigenerzeugte, nichtmarktfähige Produkte, wie z.B. Futtermittel, ein.

Ertragssteigerungen zur Erhöhung des Gewinnes unterliegen nicht nur **ökonomischen Gesichtspunkten**, sondern mehr und mehr auch **ökologischen Belangen**. Infolge der umweltpolitischen Diskussion im Hinblick auf das Spannungsverhältnis zwischen Landwirtschaft und Ressourcenschutz wird der Landwirt verstärkt mit gesetzlichen Bestimmungen, wie z.B. der Düngeverordnung oder den Auflagen für Trinkwasserschutzgebiete, konfrontiert. Umweltbelastende (und auch kostenverursachende) Überdüngungen können nur mit einer Orientierung der Düngergaben am Nährstoffentzug durch die Ernte vermieden werden. Dies ist ein weiterer Grund, weshalb der Landwirt exakte Angaben über die **Höhe der Ernteerträge** benötigt. Ein Durchschnittsertragswert für einen Schlag reicht aber nicht aus: Die von ihm abgeleitete und gegenwärtig übliche uniforme Schlagdüngung läßt Schlagheterogenitäten unberücksichtigt [155]. Da innerhalb eines Schlages Ertragshöhe und auch Bodennährstoffvorräte variieren, kann die einheitliche Düngermenge zu überhöhten Nährstoffgaben für Teilbereiche eines Schlages und damit zu mehr oder weniger großen, umweltrelevanten Restnährstoffmengen führen (Abb. 1).

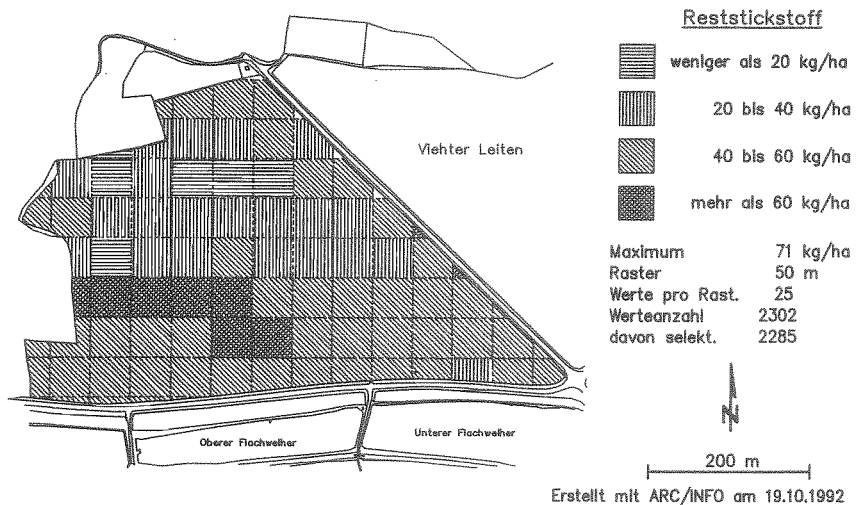


Abbildung 1: Theoretische Reststickstoffmengen auf dem "Flachfeld" (nach [25, 114]).

Deshalb müssen für eine Reduzierung der Umweltbelastungen sowohl Düngemaßnahmen als auch Ertragsermittlungen **teilschlagorientiert** erfolgen [18, 137, 153], wobei das Teilschlagkonzept eine eindeutige **Identifizierung der einzelnen Teilbereiche (Ortung)** eines Schlages erfordert.

1.2 Problemstellung

Für die Erfüllung der aufgezeigten ökonomischen und ökologischen Forderungen mangelt es nach AUERNHAMMER 1990 [18] dem Landwirt vor allem an Daten, die tatsächlich auf seinem Betrieb erfaßt wurden. Erfolgt eine Ermittlung, so entsprechen **Datenqualität und -quantität** häufig nicht den Anforderungen des Landwirts [18, 44].

Werte für den Arbeitszeitaufwand basieren oft auf unsicheren Schätzungen. Sie beschreiben meistens ein System als Ganzheit, sie sind zu ungenau, aufschlußreiche Informationen zu wichtigen Details fehlen. Aufgrund dieser Mängel beruhen Angaben über den Arbeitszeitbedarf überwiegend auf verallgemeinerten, überbetrieblichen Modellen, meist in Form von Arbeitszeitfunktionen [17]. Durch eine entsprechende Wahl der wesentlichen betriebspezifischen Einflußgrößen wird versucht, den Arbeitszeitbedarf für den Zielbetrieb mit den Modellen zu errechnen [83]. Da praktisch jeder Betrieb einen Sonderfall darstellt, ist es oft nicht möglich, die betriebliche Wirklichkeit präzise zu simulieren. Ebenso läßt sich durch das Fehlen betriebspezifischer Daten kein Ist-Soll-Vergleich realisieren.

Nicht ausreichend sind auch die Kenntnisse über die Höhen der Erntemengen. Während bei Marktfruchtbaubetrieben durch den Verkauf von Erntegütern die Betriebsleiter Angaben über die Ertragshöhen erhalten, verfügen Futterbaubetriebe aufgrund der internen Güterverwendung nur sehr begrenzt über derartige Informationen [145]. Die gegenwärtig in der Praxis üblichen Techniken zur Ertragserfassung erfordern z.T. hohe Investitionen, stören sehr häufig den Betriebsablauf und erfüllen nicht die Anforderungen einer teilschlagbezogenen Bewirtschaftung [145].

Eine Abhilfe ist nur zu verwirklichen, wenn die **unzureichenden Meß- und Datenerfassungssysteme**, die gegenwärtig zum Einsatz kommen [18, 40, 130, 158], durch neue, noch zu entwickelnde Systeme ersetzt werden. Verbesserungen zeichnen sich bereits für Marktfruchtbaubetriebe ab: Ertragsmeßeinrichtungen in Verbindung mit Ortungssystemen erreichen

z.B. bei Mähdreschern die Serienreife [8]; erste Ansätze für eine detaillierte Ermittlung von Arbeitszeitdaten auf dieser Maschine wurden bereits realisiert [169]. Im Gegensatz dazu sind für Futterbaubetriebe nach wie vor keine greifbaren Lösungen vorhanden. Trotz einer dringend gebotenen Verbesserung der wirtschaftlichen Lage, dem großen Potential einer Umweltbelastung aufgrund des z.T. hohen Düngeniveaus und dem bedeutenden Futterflächenanteil in der deutschen Landwirtschaft fehlt es an ausreichenden Initiativen. Deshalb befaßt sich die vorliegende Arbeit mit der Erfassung der Arbeitszeit- und Ertragsdaten in Verbindung mit Systemen zur Ortung auf Futterbaubetrieben.

2 Stand des Wissens

Für die Erfassung von Daten in der Außenwirtschaft wurden in den vergangenen Jahren eine Reihe von Systemen entwickelt. Insbesondere durch die Fortschritte in der Elektronik eröffneten sich neue Wege. Für die Teilschlagorientierung bzw. für die exakte geographische Zuordnung von Meßwerten zeichnen sich durch Verbesserungen in der Ortungstechnik Lösungsansätze ab [28, 163, 171]. Eine Kombination mit weiterentwickelten Meß- und Erfassungssystemen könnte die Datengrundlage für eine erfolgreiche und umweltorientierte Betriebsführung erheblich verbessern.

2.1 Positionsermittlung und Georeferenzierung

Positionsermittlung oder Ortung (Kurzform des Begriffes Ortsbestimmung) bedeutet, die Bestimmung des eigenen Standortes oder die Festlegung des Ortes eines Objekts in einem Bezugssystem (Koordinatensystem) durch geeignete Verfahren [4]. Ist der Ort ermittelt, so können andere erfaßte Größen mit den Koordinaten des Ortes versehen werden (Georeferenzierung), wodurch eine exakte geographische Datenzuordnung ermöglicht wird.

2.1.1 Ortungsmöglichkeiten für Fahrzeuge

Bei der Ortung wird zwischen aktiver und passiver sowie zwischen Eigen- und Fremdortung unterschieden [4]. Kennzeichnend für die aktive Ortung ist die Erzeugung und Abstrahlung von Signalen, z.B. Radar; bei der passiven Ortung werden dagegen Signale nur empfangen, z.B. Funkpeilung. Für die Einteilung nach Fremd- und Eigenortung entscheidet die Bezugslage: Befinden sich die Ortungsmittel an Bord des Fahrzeuges, dessen Position ermittelt werden soll, so handelt es sich um Eigenortung, wird der Ort des Objektes von einer oder mehreren Ortungsstationen aus ermittelt, so liegt Fremdortung vor [4]. Da es sich bei vielen Ortungstechniken um Mischformen der Eigen- und Fremdortung handelt, bietet sich nach AUERNHAMMER et al. 1994 [30] für eine Systematik in der Landwirtschaft eine Einteilung in fahrzeugautonome Sensorsysteme und Sender-/Empfängersysteme an (Abb. 2).

Fahrzeugautonome Sensorsysteme arbeiten ohne Unterstützung durch die Umwelt, d.h. sie bedürfen keiner bestimmten technischen Infrastruktur. Im Gegensatz dazu sind Sender-/Empfängersysteme auf eine mehr oder weniger aufwendige Infrastruktur angewiesen.

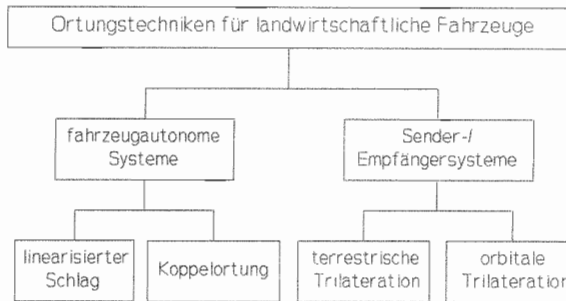


Abbildung 2: Systematik der Ortungssysteme für die Landwirtschaft (nach [30]).

2.1.1.1 Fahrzeugautonome Sensorsysteme

Ein einfaches Verfahren fahrzeugautonomer Sensorsysteme ist der **linearisierte Schlag**. Es basiert auf bestehenden Leitlinien für die Arbeitsbreite, z.B. Fahrgassen, Reihen und auf einer fortlaufenden Wegmessung [29]. Die zu fahrenden Fahrzeugbahnen werden nummeriert und die jeweilige Fahrbahnnummer bildet die erste (diskrete) Koordinate eines Ortes. Die zweite Koordinate wird über die Wegmessung innerhalb der Fahrzeugbahn zur Verfügung gestellt. Für den gesamten Schlag muß bei jeder Befahrung immer die gleiche Reihenfolge der Fahrgassen und der gleiche Durchfahrungsinn strikt eingehalten werden. Ein einmal festgelegtes Fahrgassenraster muß auch über die Jahre hinweg befolgt werden. AUERNHAMMER et al. 1993 [29] ermittelten beim linearisierten Schlag Fehler von $\pm 3 - 12 \%$ für den Fahrgassenabstand und $\pm 1 - 3 \%$ für die Weglänge. Dem geringen technischen Aufwand dieses Systems steht die Notwendigkeit einer zuverlässigen Bedienung und eines hohen organisatorischen Aufwandes gegenüber. Einschränkungen ergeben sich bei Fahrzeugen mit unterschiedlicher Arbeitsbreite.

Bei der **Koppelortung** (engl.: "dead reckoning") wird über Messung des Weges und der Richtung kontinuierlich die Bewegung des Fahrzeugs ermittelt. Ausgehend von einem Null- oder Totpunkt ("dead") kann durch Integration der Bewegungselemente die Fahrzeugposition zu jeder Zeit berechnet ("reckoning") werden. Die einzelnen Varianten der Koppelortung unterscheiden sich in erster Linie durch den technischen Aufwand und die erzielbaren Genauigkeiten. Allen ist aber zu eigen, daß sich Fehler fortpflanzen und akkumulieren, bis ein Neustart am Ausgangspunkt durchgeführt wird [117].

2.1.1.2 Sender-/Empfängersysteme

Der Großteil der Sender-/Empfängersysteme beruht auf der Trilateration [35]. Sie wird mit Hilfe elektromagnetischer Signale durchgeführt, mit denen die Distanzen zwischen dem zu ortenden Fahrzeug und zwei oder mehreren Stellen mit bekannter Position (Trilaterationspunkte) gemessen werden. Ausgehend von einer gleichbleibenden Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale und der ermittelten Laufzeit werden die Entfernungen berechnet und somit der Ort des Fahrzeugs bestimmt. Als Signale dienen Licht-, Radio-, Mikro- oder Ultraschallwellen.

Erfolgt die Trilateration bzw. die Positionsermittlung über die Auswertung von empfangenen Signalen aus fremden Quellen (installiert an den Trilaterationspunkten), so handelt es sich um Einwegmessung. Bei der Zweiwegmessung werden die Signale vom Fahrzeug ausgesendet, an den Trilaterationspunkten reflektiert und vom Fahrzeug wieder empfangen [74]. Die Trilateration ist sowohl terrestrisch als auch orbital möglich.

Terrestrische Trilateration

Bei der terrestrischen Trilateration kommen als Trilaterationspunkte im Gelände aufgestellte Reflektoren oder Sender (Baken) zum Einsatz, wobei zur dreidimensionalen Ortung mindestens drei Punkte notwendig sind.

Über den Einsatz auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen wird von mehreren Autoren berichtet. WAGNER und SCHROCK 1986 [183] testeten "LORAN-C", ein in den USA weit verbreitetes Navigationssystem für die Schifffahrt, das in Küstennähe auch an Land genutzt werden kann. Sie ermittelten beim Mähdreschereinsatz eine Ortungsgenauigkeit von ca. 20 m. Bei der Pestizidausbringung mit Sprühflugzeugen wurde LORAN-C bereits kommerziell eingesetzt [163]. SCHUELLER und BAE 1987 [161] führten ebenfalls mit einem System aus dem nautischen Bereich Versuche beim Mähdrusch durch. Die aufgetretenen Ortungsfehler betragen weniger als 1 m. CHOI et al. 1990 [52] konnten mit einem System der Firma D&N MICRO PRODUCTS die Position eines Traktors auf etwa 50 cm genau bestimmen. PALMER 1991 [128] konstruierte eine Anlage speziell für den landwirtschaftlichen Bereich. Bei ihr betragen die Ortungsfehler nur wenige Zentimeter.

Beim Einsatz derartiger Anlagen ist ein "Sichtkontakt" zwischen dem Fahrzeug und den Baken eine wesentliche Voraussetzung. Hügeliges oder bebautes Gelände zwischen Fahrzeug und Baken führt deshalb zu Ortungsstörungen [29]. Dieser Nachteil kann durch eine Integration zusätzlicher Baken abgeschwächt werden, die Kosten für eine derartige Infrastrukturerweiterung nehmen aber entsprechend zu.

Orbitale Trilateration

Wird der Ort der (aktiven) Baken in den Weltraum an Bord von Satelliten verlegt, ergeben sich im Vergleich zur terrestrischen Trilateration zwei wesentliche Vorteile:

- Aufgrund der weitreichenden "Sichtbarkeit" eines Satelliten, kann mit einer geringen Anzahl an Satelliten der gesamte Globus abgedeckt werden.
- Weil im Gegensatz zur terrestrischen Ortung die Signalwellen nicht mehr der Erdkrümmung folgen müssen, kann mit wesentlich höheren Signalfrequenzen gearbeitet werden [106]. Interferenzen durch statische Elektrizität und Wettererscheinungen werden dadurch weitgehend ausgeschaltet [36].

Mitte der 60er Jahre begann deshalb die Entwicklung von Satellitenortungssystemen [38, 106].

2.1.2 Satellitenortungs- und Navigationssysteme

Im Jahre 1973 wurde vom amerikanischen Verteidigungsministerium eine neues System in Auftrag gegeben, das dem stationären oder dem mobilen Nutzer seine exakte dreidimensionale Position, seine Geschwindigkeit und die genaue Zeit überall auf oder nahe der Erde zur Verfügung stellt. Dabei sollten diese Informationen ständig geliefert werden und es sollte eine Unabhängigkeit von Wetterbedingungen gegeben sein [42]. Daraus entstand das "NAVigation Satellite Timing And Ranging - Global Positioning System (NAVSTAR-GPS)" (in der vorliegenden Arbeit wird - wie allgemein üblich - die Kurzbezeichnung "GPS" verwendet). Parallel dazu wurde auch in der ehemaligen UdSSR ein Satellitenortungssystem mit einer ähnlichen Leistungsfähigkeit entwickelt. Dieses trägt den Namen "GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)" (deutsch: Globales Navigationssatellitensystem).

GPS und GLONASS sind gegenwärtig die bedeutendsten Ortungs- und Navigationssysteme. Da sich beide Systeme in den wesentlichen Grundzügen und Eigenschaften nicht allzu sehr unterscheiden, wird in den nachfolgenden Erläuterungen das amerikanische GPS näher vorgestellt. Nur bei wichtigen Unterschieden, die besonders für den landwirtschaftlichen Einsatz relevant sind, wird auch auf GLONASS näher eingegangen werden.

2.1.2.1 Aufbau und Konfiguration des GPS

Das Gesamtsystem besteht aus den drei voneinander getrennten Funktionssegmenten: Raum-, Kontroll- und Nutzersegment (Abb. 3).

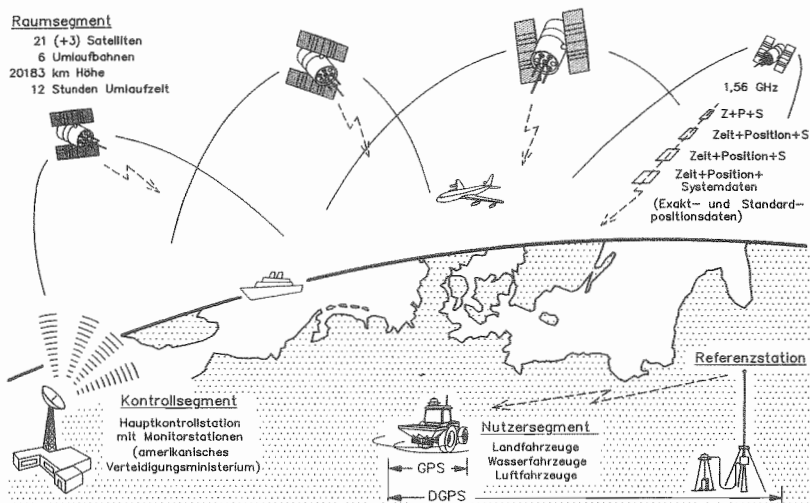


Abbildung 3: Aufbau des NAVSTAR-GPS (nach [22, 42]).

Der Aufbau des Raumsegments begann 1978 [42] und ist seit 1995 abgeschlossen ("Full Operational Capability") [35]. Es besteht aus 21 (+ 3 Reserve-) Satelliten, die auf sechs Umlaufbahnen die Erde in einer Höhe von 20183 km umkreisen. Durch die ausgewählten Satellitenbahnen ist sichergestellt, daß zu fast jeder Zeit an jedem Ort mindestens vier Satelliten nutzbar sind.

Das Kontrollsegment ist für die Überwachung und Steuerung des Raumsegments zuständig. Eine entscheidende Aufgabe dieser Kontrolleinheit ist die Positionsermittlung der Satelliten, da das von den Satelliten abgestrahlte Signal als wesentliche Größe auch die Position des Satelliten enthalten muß.

Die Gesamtheit aller Anwender, die Ortung und Navigation auf dem Land, auf dem Wasser oder in der Luft durchführen oder Zeitinformationen erhalten wollen, bildet das Nutzersegment.

2.1.2.2 GPS-Signal und Verfahren der Ortung mit GPS

Jeder GPS-Satellit sendet ständig Signale auf zwei Frequenzen aus: Signal "L₁" mit einer Frequenz von $f_1=1575,42$ MHz und Signal "L₂" mit $f_2=1227,60$ MHz. Durch die hohen Frequenzen wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Signale weniger verzögert; zugleich ermöglicht die parallele Auswertung von Signalen unterschiedlicher Frequenz eine Kompensierung von störenden Einflüssen der Ionosphäre [93].

Das L₁-Signal überträgt den "C/A-Code (Coarse/Acquisition-Code)" (deutsch: Groberfassungscodex) und den "P-Code (Precise Code)" (deutsch: Präzisionscodex), das L₂-Signal ausschließlich den P-Code. Für den nicht autorisierten Anwender, in der Regel der zivile Nutzer, steht einzig der C/A-Code und damit nur der weniger genaue "SPS (Standard Positioning Service)" (deutsch: Standard-Positionierungsdienst) zur Verfügung. Einzig militärische Stellen und besonders autorisierte zivile Anwender haben auch Zugriff auf den P-Code, der den "PPS (Precise Positioning Service)" (deutsch: Präzisions-Positionierungsdienst) ermöglicht.

Der zivile Nutzer muß neben dem ungünstigeren C/A-Code noch eine weitere Einschränkung hinnehmen. Der GPS-Betreiber ist jederzeit in der Lage, dem nicht autorisierten Anwender im SPS einen Teil der verfügbaren Genauigkeit vorzuenthalten. Durch "S/A (Selective Availability)" (deutsch: eingeschränkte Verfügbarkeit) wird die Qualität der Signale verändert, was eine ungenauere Ortung zur Folge hat [93]. Außerdem kann in politischen Krisen- oder Spannungszeiten auch der noch zum Teil zivil verfügbare P-Code unbrauchbar gemacht werden: Durch "A-S (Anti Spoofing)" (deutsch: Täuschungsabwehr) wird der P-Code durch den chiffrierten "Y-Code" ersetzt, um Täuschungsmanöver durch gegnerische Störsender zu

verhindern [36]. In GLONASS sind keine vergleichbaren Techniken zur künstlichen Verschlechterung der Signale implementiert [93].

Zusätzlich zu den beiden Codes (C/A und P) sind die beiden Trägerwellen L_1 und L_2 auch mit den Navigationsnachrichten des Satelliten moduliert. Zu den wichtigsten Bestandteilen dieser Satellitennachricht gehören:

- **Korrekturdaten der Satellitenuhr:** Alle Satelliten besitzen hochgenaue Atomuhren, die zueinander synchron laufen. Trotzdem treten zwischen den einzelnen Uhren Differenzen auf; diese Abweichungen werden dem Empfänger in Form der Korrekturdaten mitgeteilt.
- **Ephemeriden des jeweiligen Satelliten:** Dies sind Mitteilungen über die exakte Position im Raum und über die Bahndaten des sendenden Satelliten.
- **Almanachdaten:** Sie enthalten die Angaben über Bahnen und Uhren aller Satelliten, aber in einer weniger detaillierten und ungenaueren Form. Mit ihrer Hilfe kann aber der Signalempfänger des Anwenders andere Satelliten schneller auffinden und Vorausberechnungen durchführen [38]. Die vollständige Übertragung der Almanachdaten aller Satelliten dauert ca. 12,5 Minuten.

Standardortungsverfahren

Die Ortung eines Fahrzeugs mit GPS erfolgt anhand der Trilaterationsmethode in Einwegmessung. Aus allen Satelliten, deren Signale über eine Antenne empfangen werden, wählt ein GPS-Empfänger auf dem Fahrzeug die vier mit den günstigsten Parameterwerten aus. Die wesentlichen Signalinformationen, die nach der Entschlüsselung des C/A-Codes zur Verfügung stehen, sind die Ortsangabe des Satelliten und der Zeitpunkt, an dem das Signal den Satelliten verlassen hat [38].

Mit diesen Angaben wird über Berechnung der sogenannten Pseudoentfernungen die Position des Fahrzeugs festgestellt. Mit dem Begriff Pseudoentfernungen wird ausgedrückt, daß es sich um fehlerbehaftete Angaben handelt: Während die Satelliten mit hochpräzisen Atomuhren ausgestattet und deshalb die Zeitmarken im Signal äußerst exakt sind, verfügt der Empfänger zur Laufzeitmessung nur über eine quarzgestützte Uhr, deren Gangfehler deutlich höher ist. Der Empfängeruhrenfehler kann aber mathematisch bestimmt und eliminiert werden [93]: Bei der Trilateration ist durch die Ermittlung der Entfernungen von drei Trilaterationspunkten die Position des Fahrzeugs im dreidimensionalen Raum exakt festgelegt. Werden nun

die Signale eines vierten Satelliten hinzugenommen, so ergeben sich vier Gleichungen, die neben den Koordinatenkomponenten den Uhrenfehler als vierte Unbekannte enthalten. Damit ist dieses Gleichungssystem eindeutig lösbar und der Uhrenfehler kann bei der Positionsberechnung eliminiert werden.

Differentielles Ortungsverfahren (DGPS)

Neben dem Uhrenfehler beeinflussen noch weitere Störgrößen die Genauigkeit der Standardortung mit GPS (Tab. 2).

Tabelle 2: Fehlerursachen und deren typische Ausmaße bei der Ortung mit GPS und DGPS (nach [94]).

Fehlerursache	GPS		DGPS	
	Fehlerausmaß [m]	Anteil [%]	Fehlerausmaß [m]	Anteil [%]
Gangschwankungen der Satellitenuhr	1,5	3,7	0,0	0,0
Selective Availability (S/A)	30,0	74,3	0,0	0,0
Ephemeriden	2,5	6,2	0,0	0,0
Schwankungen der Signalausbreitungsgeschwindigkeit				
in der Ionosphäre	5,0	12,4	0,4	26,7
in der Troposphäre	0,5	1,2	0,2	13,3
Empfängerrauschen	0,3	0,7	0,3	20,0
Mehrwegeausbreitung	0,6	1,5	0,6	40,0
Summe	40,4	100,0	1,5	100,0

Die stärkste Beeinträchtigung geht dabei von der künstlichen Signalverschlechterung (S/A) aus. Dieser Fehler und weitere Störgrößen können aber durch die Nutzung des GPS im differentiellen Modus ("DGPS") ausgeschaltet werden. Da bei zwei Empfängern, die nicht zuweit voneinander entfernt sind, die Fehler und deren Größen nahezu identisch sind, ist durch den Einsatz eines zusätzlichen Empfängers eine Quantifizierung der Fehler möglich. Während sich der erste Empfänger auf dem Fahrzeug zur Fahrzeugortung befindet, wird ein zweiter Empfänger stationär auf einem Punkt betrieben, dessen Position, z.B. aus terrestrischen Messungen, exakt bekannt ist (Abb. 4).

Durch den ständigen Vergleich der tatsächlichen Position mit den Positionsangaben des GPS-Empfängers dieser Referenzstation wird der GPS-Ortungsfehler ermittelt. Diese

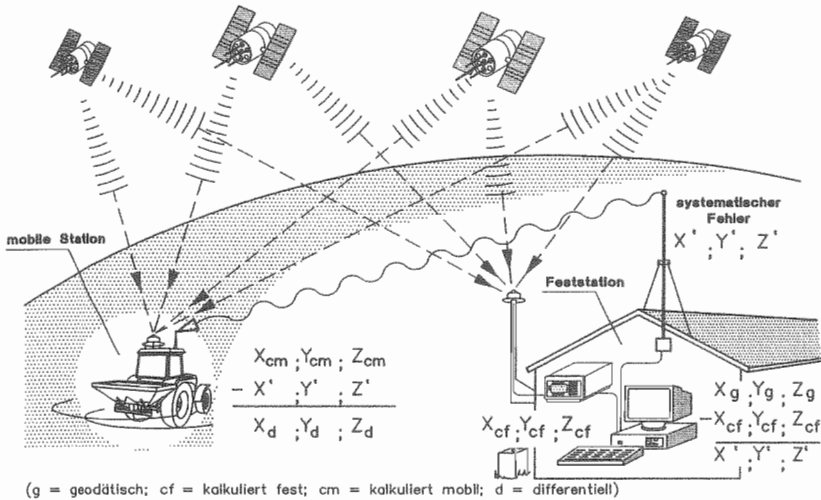


Abbildung 4: Aufbau und Funktionsweise des differentiellen GPS (DGPS) (nach [42, 156]).

Fehlerinformation setzt die Mobileinheit zur Genauigkeitssteigerung ein. Die Korrektur kann in Echtzeit erfolgen ("Online-DGPS"), wenn per Funk die Korrekturangaben von der Referenzstation zum Fahrzeug ständig übertragen werden. Eine Korrektur ist auch später zu jedem Zeitpunkt möglich ("Post Processing"), falls die Positionen des Fahrzeugs und die Korrekturdaten der Referenzstation gespeichert wurden.

Eine weitere Möglichkeit der Genauigkeitssteigerung liegt in der Analyse der Trägerphasen [38]. Werden Veränderungen der elektromagnetischen Eigenschaften der Trägerphasen registriert und ausgewertet, so können mit den gewonnenen Informationen die Ortungsfehler verringert werden. Dieses Verfahren eignet sich auch für den Standardbetrieb.

Als Ergebnis der Ortung werden die geographischen Koordinaten des Standortes und die Höhe über dem Meeresspiegel ausgegeben. Den Koordinaten liegt als Bezugssystem (geographisches Datum) das "WGS 84 (World Geodetic System 1984)" zugrunde [106]. Je nach Empfängertyp sind auch eine Reihe weiterer Angaben möglich, wie z.B. die Uhrzeit, die Fahrgeschwindigkeit und -richtung, die Anzahl an Satelliten, deren Signale empfangen werden, oder Werte, die Rückschlüsse auf die Ortungsgenauigkeit ermöglichen.

2.1.3 Eigenschaften des GPS und Ortungsgenauigkeit

GPS zeichnet sich durch eine Reihe von Eigenschaften aus, die in dieser Kombination von keinem anderen Ortungsverfahren geboten werden:

- Weltweit rund um die Uhr verfügbar
- Keine Beeinflussung durch Wettergeschehnisse
- Infrastruktur vom Betreiber (US-Verteidigungsministerium) aufgebaut und betreut
- Echtzeitfähig
- Unbegrenzte Nutzerzahl
- Keine Beeinträchtigung durch raue Einsatzbedingungen

Darüber hinaus ist mit GPS/DGPS eine genaue Ermittlung der Position möglich. Je nach Betriebsart liegen laut Abschätzungen von KRÜGER et al. 1994 [105] die Ortungsfehler in einem Bereich von ca. 2 mm bis etwa 100 m (Abb. 5).

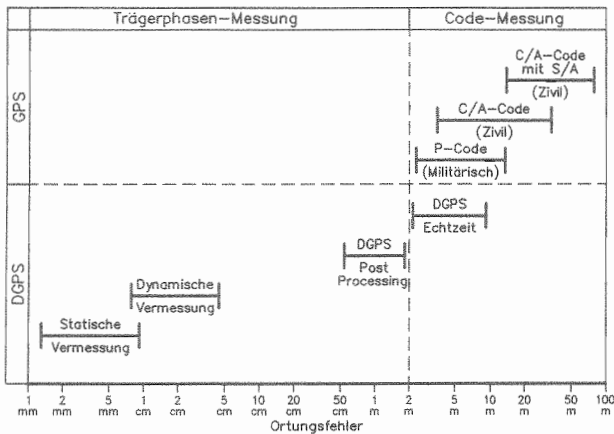


Abbildung 5: Ortungsgenauigkeiten mit GPS und DGPS (nach [105]).

Eine Ortungsgenauigkeit im Milli- und Zentimeterbereich ist gegenwärtig nur bei stationären Messungen und mit einem sehr hohen technischen Aufwand erreichbar. Sie ist deshalb geodätischen Anwendungen vorbehalten. Mit DGPS liegen die Ortungsfehler in einem Bereich von etwa 0,5 bis 10 m. Im Standardbetrieb und mit S/A erstrecken sich die Fehler bis zu 100 m. Da eine Abschaltung der gegenwärtig aktiven S/A nicht abzusehen ist und der P-Code dem

zivilen Nutzer nicht zur Verfügung steht, ist eine Ortung mit Fehlern im Meterbereich für den nichtmilitärischen Benutzer nur durch den differentiellen Betrieb realisierbar.

Eine entscheidende Rolle bei der Ortungsgenauigkeit spielt die Anzahl der "sichtbaren" Satelliten und ihre Stellung zueinander (Konstellation oder Abdeckungsgeometrie). Ein Maß für die Signalabdeckungsgeometrie und damit für die mögliche Ortungsgenauigkeit sind die "DOP (Dilution of Precision)"-Faktoren [93]. Für den Positionsfehler in der Ortungspraxis ist der "PDOP (Position Dilution of Precision)" (deutsch: Genauigkeitsverwässerung der Position) der relevante Faktor. Eine ideale Satellitengeometrie für die dreidimensionale Ortung wäre bei einem PDOP-Wert von eins gegeben. Darüber liegende Werte bis zu einer Größe von drei werden als gut erachtet, von über drei bis acht handelt es sich noch um zufriedenstellende Werte, PDOP-Zahlen von über acht gelten als mangelhaft [36]. Bei der Satellitenauswahl berücksichtigt der GPS-Empfänger die Satelliten, die zu den kleinsten DOP-Faktoren führen.

Aufgrund der Bahnparameter der Satelliten wäre größtenteils eine gute Abdeckung gegeben. Da aber Berge, Bäume oder Gebäude die Signalausbreitung stören, können die Kontakte zu Satelliten abreißen und Ortungsbeeinträchtigungen vorkommen [166]: Wechselt der Empfänger aufgrund dieser Abschattungsproblemen zu einem anderen Satelliten (neue Abdeckungsgeometrie!), so kann ein Genauigkeitsabfall von mehreren Metern eintreten [166]. Sinkt die Anzahl der erfaßten Satelliten unter vier, so ist keine dreidimensionale Ortung mehr möglich, geht sie noch weiter zurück, fällt die Ortung ganz aus.

2.1.4 Einsatz des GPS in der Landwirtschaft

Im "Deutschen Funknavigationsplan 1996" [35] sind die Anforderungen an ein Satellitenortungs- und Navigationssystem definiert. Die Abschnitte aus dem Bereich "Information und Dokumentation", die für die Landwirtschaft gelten, zeigt Tabelle 3.

Die **Verfügbarkeit** des GPS verbesserte sich in den vergangenen Jahren erheblich. Dies zeigen die Ergebnisse von Fahrspuranalysen bei Erntemaschinen (Abb. 6).

Im ersten Jahr dieser Untersuchungen konnte nur für einen kleinen Teil des Schlages "Schlüterhof" eine Fahrspur ermittelt werden, da erst relativ wenige Satelliten auf ihren

Tabelle 3: Systemanforderungen der Landwirtschaft an ein Satellitenortungs- und Navigationssystem (nach [35]).

Aufgabe - Anwendung	Verfügbarkeit		tolerierb. Abschatt. [s]	Ortungsintervall [s]	Genauigkeit [m]
	Raum [dim]	Zeit [%]			
- Ausbringmengenüberwachung	2	99	5	3	5 - 10
- Erntemengenüberwachung	2	99	5	3	2 - 5
- Maschineneinsatzüberwachung	2	99,9	5	3	2 - 5
- Flächeninventur	3	99,9	<1	1	0,5 - 1

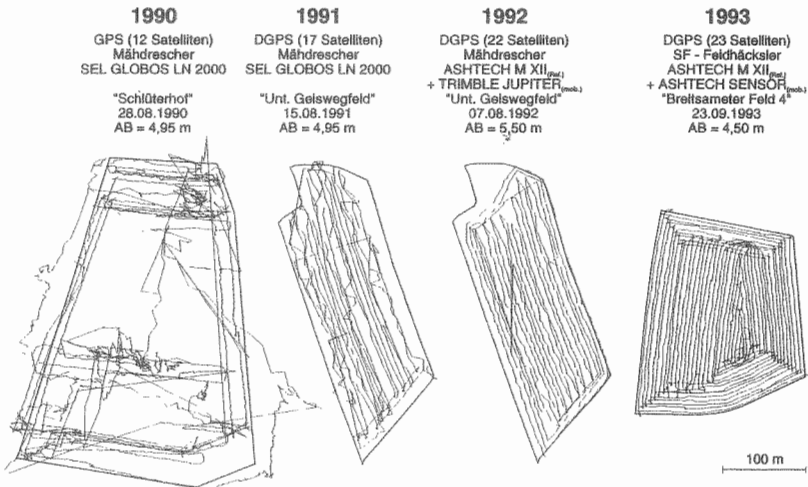


Abbildung 6: Fahrspuranalysen mit Satellitenortung GPS/DGPS bei Erntearbeiten in den Versuchsjahren 1990 bis 1993 (nach [20]).

Umlaufbahnen waren. Mit zunehmendem Systemausbau stieg die Anzahl an Satelliten und deren Verfügbarkeit, so daß im Jahr 1993 bei der Analyse der Fahrspuren keine Ausfälle mehr zu erkennen sind. Im Dezember 1993 wurde die Hauptphase des Systemaufbaus abgeschlossen und der Zustand "Initial Operational Capability" (deutsch: anfängliche Funktionsfähigkeit) erreicht, so daß GPS zur zwei- oder dreidimensionalen Positionsermittlung theoretisch immer verfügbar ist. Das amerikanische Verteidigungsministerium sichert seit diesem Zeitpunkt für mindestens zehn Jahre Zugang und Betrieb zu [91], behält sich aber das Recht vor, unangekündigt oder kurzfristig in das System einzugreifen und garantiert nur, daß

betreiberbedingt zu 95 % der Zeit eine Ortung (mit einer Mindestgenauigkeit von ± 100 m) möglich ist. Folglich wären Ausfälle von bis zu 5 % möglich und die Forderung einer Verfügbarkeit von 99 oder 99,9 % nicht ständig erfüllbar.

Bei dem dargestellten Fahrweg aus dem Jahre 1993 war die Verfügbarkeit des GPS stets gegeben, aber Schlußfolgerungen über die Verfügbarkeit für größere Zeiträume lassen sich daraus nicht ziehen, da die Aufzeichnungszeit bei diesem Versuch mit einigen Stunden relativ kurz war und auch keine weiteren Ergebnisse aus dem landwirtschaftlichen Bereich zur Verfügbarkeit im größeren Zeitrahmen gefunden werden konnten.

Nach den Angaben in Tabelle 3 dürfen beim Großteil der Aufgaben die **Abschattungen** maximal 5 s dauern. An Waldrändern oder auf der Hofstelle, umgeben von Gebäuden, könnten bei der Ortung mit GPS diese Toleranzen überschritten werden. Zwar gibt es bereits Untersuchungsergebnisse zu Abschattungen unter typisch landwirtschaftlichen Bedingungen [166], deren Schwerpunkt liegt jedoch auf der Genauigkeit der Ortung. Ausführliche Aussagen über die Dauer von Abschattungen und inwieweit diese zu Ortungsausfällen führten, sind nicht zu finden. Außerdem betrug die jeweiligen Versuchsfahrten nur wenige Minuten.

Die Länge der **Ortungsintervalle** wird im wesentlichen von der Leistungsfähigkeit des GPS-Empfängers bestimmt. Intervalle von einer Sekunde und kürzer sind bei höherwertigen Geräten üblicherweise möglich [11]. Die Anforderungen an die Ortungsintervalle werden deshalb vollständig befriedigt.

Nach den Angaben von KRÜGER et al. 1994 [105] (siehe Abb. 5) kann GPS die geforderten **Genauigkeiten** im differentiellen Modus erreichen. Dies bestätigen Versuchsergebnisse landwirtschaftlicher Einsätze [2, 26, 30, 54, 62, 68, 109, 133, 140, 154, 173], wobei aber die Untersuchungen innerhalb eines relativ kurzen Jahresabschnitts (meistens Erntezeit) abliefen. Ergebnisse von Versuchen über größere Zeiträume, z.B. mehrere Monate, sind nicht bekannt. Es wurden zwar Tests in aufeinander folgenden Jahren durchgeführt, aber sie erfolgten fast immer unter anderen Bedingungen, z.B. andere Standorte und/oder GPS-Empfänger. Systematische Untersuchungen zu Schwankungen der Ortungsgenauigkeit über einen längeren Zeitraum wurden nicht unternommen. Deshalb sind z.B. keine Rückschlüsse möglich, inwieweit Veränderungen im Kontroll- oder Raumsegment durch den Betreiber oder die eigene GPS-Anlage die Ortungsgenauigkeit im täglichen Einsatz beeinträchtigen.

Gegenwärtig wird in der Landwirtschaft zur Ortung mit Satelliten nur GPS verwendet, Berichte über den Einsatz von GLONASS sind in der zur Verfügung stehenden Literatur nicht zu finden. Es gibt auch keine Ergebnisse längerer Untersuchungen über Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von GLONASS [105]. Aufgrund des vergleichbaren Aufbaus zu GPS kann angenommen werden, daß bezüglich Verfügbarkeit, Abschattungen und Genauigkeit keine großen Unterschiede zum amerikanischen System existieren. Da aber bei GLONASS keine Signalverfälschungen wie bei GPS mit S/A stattfinden, können im Standardbetrieb höhere Ortungsgenauigkeiten erzielt werden [105].

2.1.5 Georeferenzierung

GPS bietet die Voraussetzungen zur Feststellung des genauen geographischen Erfassungsortes verschiedenster Größen. Werden die Werte für diese Größen mit einer entsprechenden Meßdichte ermittelt und die Koordinaten der Meßorte festgehalten, so ist die räumliche Variabilität der Größen präzise ermittelbar. Mit diesem Verfahren werden z.B. schon seit einigen Jahren die Ertragsheterogenität beim Mähdrusch oder die räumlichen Unterschiede von Bodennährstoffen erfolgreich bestimmt [62, 89, 113, 121, 131, 173, 188]

Die Zusammenführung und die Analyse der Koordinaten und Meßwerte erfolgt überwiegend mit "geographischen Informationssystemen (GIS)", die eine Kombination aus einem Graphikprogramm und einer Datenbank darstellen [70]. Mit dem Graphikteil können geographische Positionspunkte, Karten oder Pläne wiedergegeben und/oder gezeichnet werden. In der Datenbank werden die zu den graphischen Elementen gehörenden Daten, die verschiedenster Natur sein können, abgespeichert: von numerischen Werten einer Ertragsermittlung, über Schlagnamen oder Schlagnutzungsarten bis hin zu *Boole*'schen Variablen. Daten können dabei in verschiedenen Ebenen, z.B. Erträge verschiedener Jahre eines Schrages, oder Hierarchien, z.B. Gesamtbetrieb - Einzelschlag, abgelegt werden. Zur Standardausstattung zählen Konvertierungsmodule, die Koordinatentransformationen, z.B. von WGS 84 ins *Gauß-Krüger*-System, dem in Deutschland üblichen Koordinatensystem, durchführen.

Ein GIS ist auch ein Analysewerkzeug. Analysen sind sowohl mit dem Graphik- als auch mit dem Datenbankmodul möglich. Einfache Auswertungen erlauben die Berechnung von Abständen und zurückgelegten Wegstrecken oder die Ermittlung von Flächen (Polygone), die von mehreren Grenzpunkten aufgespannt werden. Komplexere Auswertungsverfahren

ermöglichen das Verschneiden von geographischen Objekten oder verschiedenen Ebenen, z.B. Überlagerung verschiedener thematischer Ebenen [79] und die graphische Erzeugung von Teilflächen oder neuen Ebenen, die weitere Beziehungen zwischen Elementen oder Daten unterschiedlicher Ebenen darstellen. Ergebnisse von Analysen können in Form von Karten, z.B. Ertragskarte, oder in einer tabellarischen Auflistung, z.B. Zeiten zur Bewältigung von Strecken, ausgegeben werden.

2.2 Arbeitszeiterfassung

Die Gesamtarbeitszeit läßt sich relativ einfach und ohne großen Aufwand messen. Ihre Aussagekraft ist aber gering und Schlußfolgerungen sind nur in begrenztem Umfang möglich. Für detaillierte und verwertbare Information über den Arbeitszeitaufwand, muß die Gesamtarbeit aufgliedert und der Zeitaufwand für die einzelnen Teile ermittelt werden.

2.2.1 Gliederung der Arbeit in Abschnitte und Arbeitsarten

Die von AUERNHAMMER 1975 [14] entwickelte Form der **hierarchischen Gliederung in Arbeitsabschnitte** ist gegenwärtig der Standard in der landwirtschaftlichen Arbeitswissenschaft [82]. Bei dieser Aufgliederung erfolgt eine Unterteilung der Gesamtarbeit solange bis Abschnitte entstehen, die im Bezug auf den Arbeitszeitwand nur noch von wenigen Faktoren (etwa ein bis drei) beeinflusst werden. Dadurch wird die Arbeitszeitdatenerhebung wesentlich erleichtert [17]. Abbildung 7 zeigt beispielhaft diese Aufgliederung bei der Produktion von Wiesenheu mit Einsatz der Rundballenpresse.

Die Gesamtarbeit wird in ein- oder mehrmals zu wiederholende, produktspezifische und in sich geschlossene Arbeitsvorgänge unterteilt. Eine Ebene tiefer liegen die Arbeitsteilvorgänge, die ebenfalls in sich geschlossene Abschnitte (nach Ort und Zeit) darstellen, aber häufig produkunspecifisch sind. Arbeits- bzw. Prozeßelemente und Bewegungsgrundelemente bilden die kleinsten Analyseeinheiten [14].

Bei der **Zuordnung nach Art der Arbeit** steht das Arbeitsziel im Vordergrund [135]. Die erste Unterteilung erfolgt deshalb nach reiner Tätigkeit und Tätigkeitsunterbrechung [34] (Abb. 8).

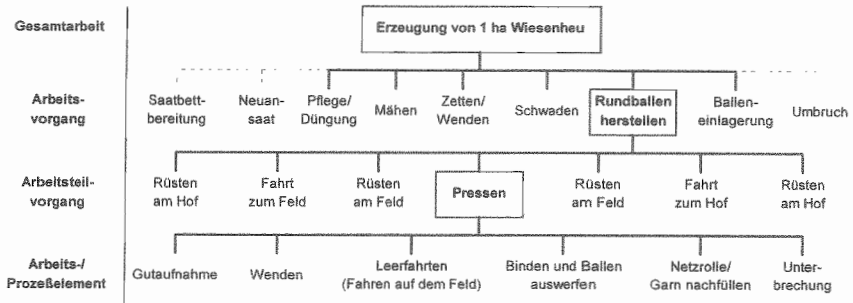


Abbildung 7: Aufgliederung der Arbeit in Arbeitsabschnitte bei der Produktion von Wiesenheu am Beispiel der Rundballenpresse.

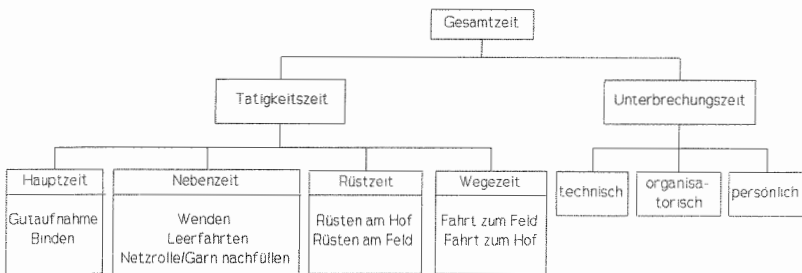


Abbildung 8: Zuordnung der Arbeitszeit nach Art des Zeitverbrauchs am Beispiel eines Einsatzes der Rundballenpresse.

Innerhalb der Tätigkeitszeit wird die dem Ziel dienliche Tätigkeit als Hauptzeit ausgewiesen. Nebenzeiten, Rüstzeiten oder Wegezeiten für Fahrten zwischen Hof und Feld dienen dem Arbeitsziel nur mittelbar. Bei Tätigkeitsunterbrechungen, die Verlustzeiten darstellen, wird nach der Ursache der Unterbrechung unterschieden. Da auf der Elementebene sowohl die Tätigkeiten als auch die Tätigkeitsunterbrechungen sichtbar werden, kann der Zeitbedarf für die verschiedenen Arbeitsarten auch über die Arbeits-/ Prozeßelemente bestimmt werden [14].

2.2.2 Zeiterhebungsmethoden

Für eine einfache und schnelle Erfassung von Abläufen - auch von technisierten Abläufen - und von Verlustzeiten ist nach AUERNHAMMER 1975 [14] von den zur Verfügung stehenden Methoden zur Feststellung des Arbeitszeitaufwandes in der Landwirtschaft die Zeitermittlung vorzuziehen. Sie erfolgt in Abhängigkeit von der Zielsetzung ganzheitlich (final) oder detailliert (kausal) [15]. Die finale Betrachtungsweise führt zu den Arbeitsarten, die kausale zu den Prozeß-/Arbeitselementen.

Finale Zeitermittlungsmethoden setzt in erster Linie der Landwirt ein. Zur Erkennung betrieblicher Problembereiche und zur Kontrolle will er insbesondere wissen, wofür die Arbeitszeit verbraucht wurde. Dazu kann er Arbeitstagebücher, Arbeitszeitkonten und DLG-Wochenberichte einsetzen [15, 17]. Sie basieren auf schriftlichen Aufzeichnungen und unterscheiden sich im Aufwand, in der Erfassungsdichte und in der möglichen Aussage. Abgesehen von der elektronischen Form von Arbeitstagebüchern, die überwiegend in computerisierten Ackerschlagkarteien oder Buchführungsprogrammen integriert sind, erlauben diese Methoden keine umfassenden oder schnellen Auswertungen [5, 60, 65, 151].

Nachteilig ist auch, daß es sich mehr um schätzende Methoden handelt. Wegen des geringeren Aufwandes werden die Zeiten für die verrichteten Arbeiten in der Regel vom Betriebsleiter - meistens am Ende des Arbeitstages - geschätzt, Messungen finden nur selten statt. Mehr oder weniger große Abweichungen von den tatsächlichen Zeiten, die sich entsprechend auf Analysenergebnisse auswirken, sind dabei nicht zu vermeiden.

Exakte betriebliche Ist-Analysen und Erstellungen allgemeingültiger Planzeiten erfordern **kausale Zeitermittlungsmethoden**. Neben dem Arbeitszeitaufwand sollen sie die Frage nach der Ursache für ein bestimmtes Ausmaß des Arbeitszeitaufwandes klären. Zur Beantwortung der Kausalitätsfrage müssen die Einflußgrößen auf den Arbeitszeitaufwand bekannt sein [83]. Eine kausale Zeiterhebungsmethode erfordert deshalb die vollständige **Erfassung der Einflußgrößen**, die sehr zahlreich und verschieden sein können. Sie werden deshalb gemessen oder geschätzt. Beim Einsatz der Rundballenpresse kommen z.B. folgende wesentliche Einflußgrößen zur Wirkung:

- Schlaggröße
- Schlaglänge
- Schlagform

- Schlagentfernung
- wirksame Arbeitsbreite
- Fahrgeschwindigkeit (bedingt durch Ertrag, Maschinenleistung und Erntegutzustand)
- Arbeitsform (Auf-Ab-, Beet- oder Rundumbearbeitung)
- Wendeform
- Ballengröße
- Art des Ballenbindens
- Rüsten

Kausale Zeitermittlungsmethoden verlangen eine exakte und eindeutige Abgrenzung (Anfangs- und Endpunkte) der Arbeitsabschnitte, so daß an verschiedenen Stellen tatsächlich die gleichen Arbeitsinhalte gemessen werden [135]. Anfangs- und Endpunkte von Arbeitsabschnitten beim Einsatz der Rundballenpresse zeigt beispielhaft Tabelle 4.

Tabelle 4: Anfangs- und Endpunkte zur Abschnittsabgrenzung beim Rundballenpressen (nach [31]).

Arbeits-/Prozebelementname	Anfang	Ende
Rüstarbeiten für die Presse	Beginn der Arbeit	Ende der Arbeit
Presse anhängen	Beginn der Arbeit	Beginn Fahrt
Fahrt Hof - Feld (Traktor leicht belastet)	Beginn Fahrt	Ende Fahrt
Presse zum Pressen vorbereiten	Ende Fahrt	Erstes Gut aufnehmen
Pressen mit Rundballenpresse	erstes Gut aufnehmen	letztes Gut aufnehmen
Rundballen binden (mit Ballen auswerfen)	letztes Gut aufnehmen	erstes Gut aufnehmen
Wenden mit Presse	letztes Gut aufnehmen	erstes Gut aufnehmen
Bindegarn oder Bindenetz nachfüllen	AP steigt von Schlepper	AP steigt auf Schlepper
Presse auf dem Feld zur Fahrt vorbereiten	letztes Gut aufnehmen	Beginn Fahrt
Fahrt Feld - Feld (Traktor leicht belastet)	Beginn Fahrt	Ende Fahrt
Fahrt Feld - Hof (Traktor leicht belastet)	Beginn Fahrt	Ende Fahrt
Presse abhängen	Ende Fahrt	Ende der Arbeit
Unterbrechung des Arbeitsganges	letztes Gut aufnehmen	erstes Gut aufnehmen

Die erfaßten Zeitwerte und Einflußgrößen werden heute üblicherweise mit computergestützten Systemen analysiert, die Erstellung von Planungszeiten ist nur mit Hilfe der EDV effektiv zu bewältigen. Eine Vielzahl an Auswertemöglichkeiten bietet hierzu z.B. das "Landwirtschaftliche Informations-System Landtechnik (LISL)" [16].

2.2.3 Erfassungstechniken

Je nach Zielsetzung einer Arbeitszeitanalyse werden unterschiedliche Techniken zur Erfassung eingesetzt.

2.2.3.1 Erfassungstechniken bei der finalen Analyse

Für die Erfassung der Arbeitszeitdaten zur finalen Analyse gibt es eine Reihe von Techniken, die unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen.

Die einfachste Form ist das **Schätzen** der Zeiten und die Aufnahme der relevanten Daten ins Gedächtnis. Aufgrund der Unabhängigkeit von technischen Hilfsmitteln und der Einfachheit kann diese Technik jederzeit und von jedem angewendet werden. Neben den Fehlern beim Schätzen ist bei dieser Technik die begrenzte Aufnahmefähigkeit und das Vergessen von Daten äußerst nachteilig.

Für eine präzisere Erhebung größerer Datenmengen kann der Erfasser eine Reihe **technischer Hilfsmittel** einsetzen: Zeiten werden mit einer Uhr gemessen, die ermittelten Werte werden formlos auf Notizzettel geschrieben oder in Formulare eingetragen [75, 136]. Die Aufzeichnung der Daten kann auch auf einem Taschendiktiergerät erfolgen, wodurch die Erfassung beschleunigt wird. Bei Diktiergeräten ist aber die fehlende Übersicht, eine schlechtere Handhabung und eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen wie Schmutz, Feuchtigkeit, Temperatur und Lärm zu bemängeln. Zusätzlich erschweren sie in einem noch viel stärkeren Maße als Formulare die Weiterverarbeitung der Daten.

Trotz der Verwendung technischer Hilfsmittel kommt es öfters zu **fehlerhaften Daten** oder **Datenverlusten**. BÖCKL 1988 [44] führte Untersuchungen auf einem Betrieb zur Beurteilung der Datengüte durch. Auf dem 90 ha-Betrieb mit mehreren Arbeitskräften wurden in der Außenwirtschaft Arbeitszeitdaten mit Uhren und Formularen ermittelt. Er konnte zeigen, daß in dem einjährigen Untersuchungszeitraum nur 86,3 % der Daten durch tatsächliche Erfassung zustande kamen, 7,3 % waren geschätzt und 6,4 % der Daten waren unsicher. Die Verteilung der Daten unterschiedlicher Güte zeigt eine starke jahreszeitliche Abhängigkeit (Abb. 9).

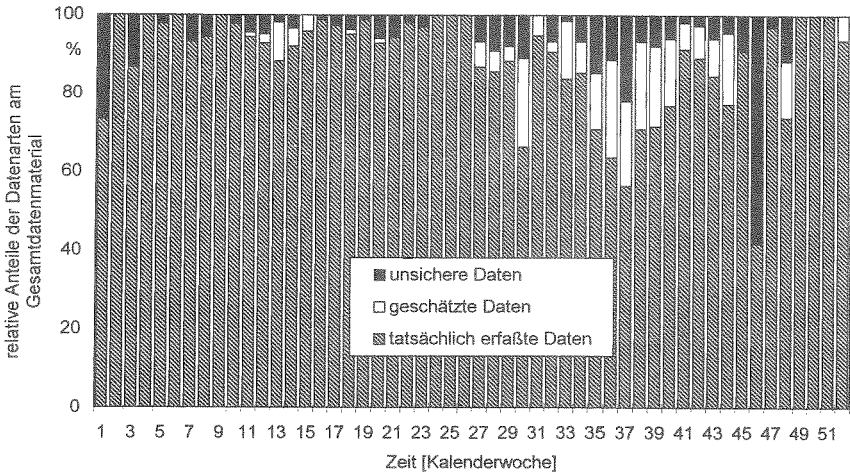


Abbildung 9: Die Güte erfaßter Arbeitszeitdaten auf dem Betrieb Schwarzer im Jahresablauf 1985 (nach [44]).

Vor allem in den Sommer- und Herbstmonaten ist der Anteil der unsicheren und geschätzten Daten am höchsten. Die Ursache dafür liegt in der Arbeitsperson, die aufgrund des hohen Arbeitsanfalls in diesen Zeiträumen oft übermüdet oder überlastet ist. Die Aufzeichnung der Werte wird häufig nicht beim Datenanfall, sondern erst später durchgeführt. Bis zum Eintrag können aber Werte vergessen werden; eine nachträgliche Ermittlung ist in den meisten Fällen nicht mehr oder nur durch ungenauere Schätzungen möglich. Häufig wird das Aufzeichnen selbst vergessen.

Abhilfe hierzu bieten **automatisierte Systeme**, wie das von GAUTZ et al. 1988 [76]. Dieses teilt einen landwirtschaftlichen Betrieb mit Hilfe von elektronischen Schranken in verschiedene Bereiche ein. Beim Passieren einer Schranke teilt ein Sender in der Schranke einem Computer auf dem Fahrzeug die Nummer des anstehenden Sektors und die Passierzeit mit. Mit Hilfe dieser Daten kann die Verweildauer in einem Bereich ermittelt und Rückschlüsse über den Arbeitszeitaufwand gemacht werden. Nach wie vor wird nicht erfaßt, welche Arbeit die Arbeitsperson in einem Bereich tatsächlich erledigt hat. Werden mehrere Arbeiten innerhalb eines Sektors hintereinander ausgeführt, so können die einzelnen Zeiten nicht separat ermittelt werden. Derartige Systeme eignen sich deshalb weniger für exakte und detaillierte Aussagen zum Arbeitszeitaufwand.

Entsprechend ausgestattete **mobile Agrarcomputer** können die Gesamteinsatzzeit automatisch ermitteln [6, 40, 158]. Eine Unterteilung in Arbeitsabschnitte erfordert eine Bedienung durch den Schlepperfahrer. Per Knopfdruck am Computer können Beginn und Ende eines Abschnitts eingegeben werden. Untersuchungen zeigten, daß bei derartigen Erfassungen häufig Fehler auftreten: Bei Versuchen von BILLER 1985 [41] wurden Eingaben von der Arbeitsperson vergessen und es kam trotz teilweiser optischer und akustischer Hinweise durch das Erfassungssystem zu Fehlbedienungen. Sie traten vermehrt in Phasen auf, in denen unter starkem Zeitdruck gearbeitet wurde.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß finale Erfassungstechniken zwar einfache Techniken darstellen, sich aber für genaue und detaillierte Erhebungen der Arbeitszeit wenig eignen. Das Vorkommen **fehlerhafter oder unsicherer Werte** ist zu häufig. Die Ursache liegt oft in der Arbeitsperson, die neben der Arbeit auch die Erhebungen ausführen muß.

2.2.3.2 Erfassungstechniken bei der kausalen Analyse

Exakte Zeitmessungen und die Ermittlung der Einflußgrößen, die die kausalen Analysen verlangen, erfordern einen hohen personellen Aufwand und z.T. auch eine sehr umfangreiche technische Ausstattung.

Die einfachste Technik besteht in der Verwendung einer **Stoppuhr**, meistens mit Digitalanzeige, und eines **Aufnahmebogens**. Ein Zeitnehmer beobachtet die Arbeitsperson, ermittelt zu den auftretenden Arbeits-/Prozeßelementen die benötigten Zeiten und erfaßt die Einflußgrößen (Abb. 10).

Komfortabler ist die nach REFA¹ übliche Technik, bei der die Stoppuhr durch ein **Zeitmeßbrett** ersetzt wird [14, 149]. Beim Zeitmeßbrett handelt es sich um eine ergonomisch geformte Schreibplatte mit eingebauter Stoppuhr zum Erfassen von Differenz- und Gesamtzeiten.

¹ Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (früher **Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung**)

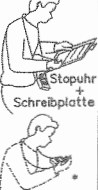








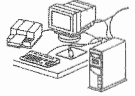
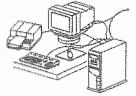
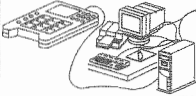
Ort	Einzelsysteme						kombinierte Systeme	
	Betrieb	Betrieb	Betrieb	Büro	Betrieb	Büro	Betrieb	Betrieb
Erfassung	 Stoppuhr + Schreibplatte	 Zeitmeßbrett	 1. Rekorder + Stoppuhr	 2. Abhören der Daten	 1. Video-Aufzeichnung	 2. Ablesen der Daten	 Zeitmeßbrett mit Speicherfunktion	 Handcomputer
Preis	DM ca. 400.-	ca. 800.-	ca. 800.-		ca. 10- 30.000.-		ca. 7-12.000.-	ca. 8.000.-
Auswertung	 manuelle Datenübertragung		 manuelle Datenübertragung		 manuelle Datenübertragung		 elektronischer Datentransfer	
Beurteilung	+billig +funktionssicher -nur lange Zeitelemente erfassbar -evtl. Schreibkraft erforderlich *		+Zusatzinformation aufdiktierbar +kurze Zeitelemente erfassbar -zusätzlicher Arbeitsgang durch Abhören der Bänder		+ständige Anwesenheit nicht erforderlich +Kontrollen erfassbar -teuer -ortsgebunden		+schneller Datentransfer +Zusatzauswertungen möglich -teuer -Systemanpassung -Einflußerfassung schwierig	

Abbildung 10: Systeme zur kausalen Erfassung und Analyse von Arbeitszeiten (nach [82]).

Neben den beiden traditionellen manuellen Techniken sind in Abbildung 10 auch Formen mit größerer technischer Ausstattung zur Verbesserung der Erfassungsgenauigkeit dargestellt.

Bei Systemen, die mit **Stoppuhr und Audiorekorder** arbeiten, werden die Zeitmarken und Kommentare durch den Zeitnehmer auf ein Audioband gesprochen [122]. Mit einem zusätzlichen Arbeitsschritt müssen die Werte vom Rekorder in Auswertungsformulare übertragen werden. Diesen Nachteil versuchte ORDOLFF 1969 [125] auszuschalten, in dem er anfallende Arbeitselemente auf Basis von Audiofrequenzen kodierte, anschließend digitalisierte und über eine Schnittstelle in einen Rechner zur Analyse übertrug.

Wird ein **Videorekorder** zur Aufzeichnung des Arbeitsablaufes eingesetzt, so kann sogar auf die ständige Anwesenheit des Zeitnehmers verzichtet werden. Dieses System eignet sich aber nur für Arbeiten, bei denen eine komplette Überwachung der Arbeitsorte möglich ist. Schwierigkeiten ergeben sich vor allem bei Arbeiten mit vielen Arbeitsorten und in der Außenwirtschaft. Ebenso können sich Probleme bei der Abgrenzung der Arbeitselemente und Ermittlung der Einflußgrößen ergeben [82]. Trotz des automatisierten Auslesens der Zeit aus den Videobildern mit Hilfe eines PC [80], müssen weitere Informationen ohne Computerunterstützung von den Bildern abgelesen und in Auswertungsformularen übertragen werden.

Neuere Erfassungssysteme bedienen sich der Computertechnologie. Dabei handelt es sich um **Zeitmeßbretter mit Speicherfunktion** oder um **Handcomputer**. Dadurch entfällt die schriftliche Aufzeichnung, die Daten werden in digitaler Form abgespeichert und stehen sofort einer elektronischen Datenanalyse zur Verfügung [168]. Handcomputer besitzen gegenüber Zeitmeßbrettern mit Speicherfunktion den Vorteil, daß sie sowohl zur Datenerfassung als auch zur Analyse frei programmierbar sind und damit der jeweiligen Zeitstudie angepaßt werden können [150]. Nach SONCK und VAN DER SCHILDEN 1994 [168] erfordern diese einfachen computerunterstützten Techniken eine sehr durchdachte Vorbereitung und Planung. Laut HAIN 1992 [82] bewähren sich diese Geräte nur bei Arbeitsabläufen mit wenigen Arbeitselementen und immer wiederkehrenden kurzen Zyklen, z.B. Melkarbeit im Melkstand.

BILLER 1985 [41] entwickelte ein **universell einsetzbares Datenerfassungssystem** mit geeigneten Sensoren zur kontinuierlichen Aufnahme und Speicherung von Schlepperdaten. Die Datenerhebung und -speicherung war ohne eine Beeinträchtigung der durchgeführten Arbeit möglich. Aus den gewonnenen Schleppereinsatzprofilen konnten erste Rückschlüsse über Arbeits-/Prozeßelemente und deren Zeitbedarf gezogen werden (Abb. 11).

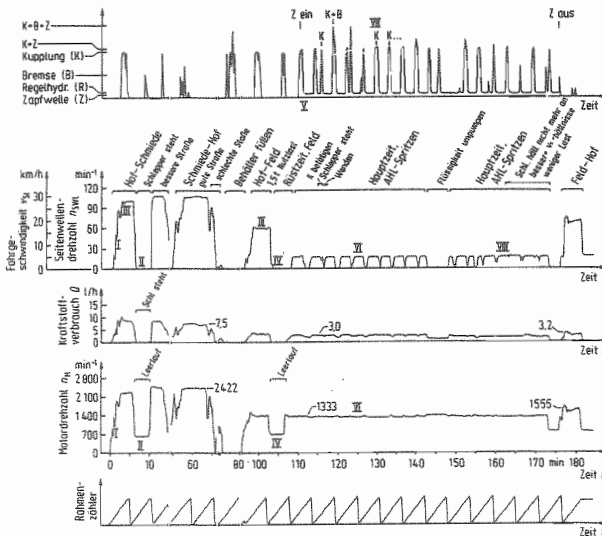


Abbildung 11: Beispiel der Datenerfassung für das Spritzen von Flüssigdünger (nach [41]).

In den Meßkurven sind z.B. Straßenfahrten (I, III) und Spritzen von Flüssigdünger (VI) an den mittleren Drehzahlen von Motor und Antriebsrädern zu erkennen, auch Rüstzeiten (IV)

und Arbeitsunterbrechungen bei laufendem Motor (II) sind herauslesbar. Eine einwandfreie Identifizierung der angefallenen Elemente oder Arbeitsarten ist mit den Meßwerten alleine nicht möglich. Nach wie vor ist ein Protokollführer erforderlich, der die Arbeits-/Prozeßelemente während des Einsatzes bestimmt und niederschreibt. Ebenso ist eine exakte Abschnittsabgrenzung mit den gewonnenen Daten nicht durchführbar. Von den Einflußgrößen auf die Arbeitszeit wird nur die Fahrgeschwindigkeit sicher ermittelt.

AUERNHAMMER und ROTTMEIER 1990 [32] erfaßten mit einem **weiterentwickelten computerisierten System** Arbeitszeiten und auch Einflußgrößen beim Ladewageneinsatz. Zurückgelegte Wegstrecken wurden mit Wegsensoren (auf Radar- oder Ultraschallbasis) gemessen, geladene Mengen über eigens installierte Gewichtssensoren an der Achse und an der Zugdeichsel. Der Zeitnehmer las die Zeiten und die Wegstrecken vom Display des Agrarcomputers ab, die Gewichte vom Anzeigefeld der Wägeeinrichtung und notierte die Werte auf einem Formular. Da der Zeitnehmer zugleich auch die Arbeitsperson war, mußte für das Ablesen und Aufschreiben der Arbeitsvorgang unterbrochen werden.

Die Erläuterungen über die Techniken für kausale Arbeitszeitanalysen zeigen, daß zur präzisen Arbeitszeitdatenerfassung neben der Arbeitsperson ein **Zeitnehmer erforderlich** ist - ein entscheidender Grund für die Kostenträchtigkeit derartiger Zeitstudien. Nachteilig ist auch, daß das Verhalten der Arbeitsperson durch die Anwesenheit eines Zeitnehmers beeinträchtigt werden kann: Bei Untersuchungen von HADN 1990 [81] verkürzte sich die für eine Aufgabe benötigte Arbeitszeit im Durchschnitt um ca. 25 % sobald ein Zeitnehmer mit Stoppuhr zur Messung anwesend war.

2.3 Ertragsermittlung

Auf Futterbaubetrieben werden Erträge von Silage, Heu oder Stroh überwiegend geschätzt. Angaben über Ertragsmengen sind deshalb unsicher und ungenau. Sichere Informationen lassen sich nur durch exakte Messungen gewinnen.

2.3.1 Verfahren der Mengenermittlung

Nach ROTTMEIER 1996 [145] bieten sich zur Feststellung der Güterquantität in der Landwirtschaft grundsätzlich die Volumenbestimmung, die radiometrische Massemessung und die Gewichtsermittlung an.

Die **Volumenbestimmung** führt mit Hilfe der Dichte zur Masse eines Gutes. Für die Kornertragsmessung wird dieses Verfahren beim Mähdröschler auf Basis eines Zellenrades zur Volumenmessung und eines Meßbeckers zur manuellen Dichtebestimmung bereits erfolgreich eingesetzt [23]. Aufgrund stark variabler Dichten wäre bei Grünfutter, Heu oder Stroh eine kontinuierliche Dichtemessung erforderlich. Diese Messung wäre aber insbesondere bei Langgut technisch nur schwer zu realisieren. Ähnliches gilt für die Ermittlung des Volumens. Aus diesen Gründen scheidet die Massebestimmung über das Volumen für Güter wie Heu oder Stroh aus.

Radiometrische Meßverfahren nutzen die Abschwächung radioaktiver Strahlung beim Durchgang durch Materie zur direkten Ermittlung der Masse [102]. Ihr Hauptvorteil ist die berührungslose Messung. In der Industrie sind sie deshalb zur Masseermittlung von Schüttgütern auf Förderbändern häufig zu finden [56]. In der Landwirtschaft werden sie für die lokale Kornertragsermittlung im Mähdröschler eingesetzt, wobei die Meßfehler mit ca. 1 % relativ niedrig liegen [24, 139].

Für die radiometrische Massebestimmung bei der Futterernte sind die Ausgangsbedingungen deutlich ungünstiger als beim Mähdrusch:

- Sehr breiter Gutstrom (in etwa Pick-up-Breite), der nur mit entsprechend großdimensionierten (und teuren) Strahlungsquellen und -detektoren erfaßt werden kann;
- Stark schwankende räumliche Dichteverteilung des Erntegutes, die die Ermittlungen erschwert [145];

Außerdem müssen die allgemeinen Nachteile der Messungen auf radiometrischer Basis bedacht werden:

- Die Verwendung radioaktiver Strahlungsquellen ist nicht ohne Bedenken möglich, da Agrarerzeugnisse direkt oder indirekt der menschlichen Ernährung dienen;
- Geringe gesellschaftliche Akzeptanz im Hinblick auf jegliche Verwendung radioaktiver Quellen;
- Strenge gesetzliche Auflagen für den Umgang mit radioaktiven Strahlungsquellen;
- Problem der unschädlichen Entsorgung der Strahlungsquelle nach Stilllegung der Maschine.

Der Einsatz der radiometrischen Masseermittlung bei der Futterernte ist deshalb äußerst fraglich.

Bei der **Gewichtsermittlung (Wägung)** wird die Gewichtskraft eines Körpers gemessen. Die Beziehung zwischen seiner Masse m und der Gewichtskraft F_{GA} wird über die auf den Körper wirkende Erdbeschleunigung g hergestellt:

$$F_{GA} = m \cdot g \quad (1)$$

Da die Erdbeschleunigung innerhalb bestimmter Grenzen als konstant betrachtet werden kann, läßt sich die Masse von der ermittelten Gewichtskraft ableiten.

Weil aber die Massebestimmung eines Körpers durch Wägung im Regelfall in Luft erfolgt, muß der Luftauftrieb berücksichtigt werden. Der relative Unterschied zwischen der Masse und dem Wägewert¹ beträgt bei den meisten Wägegütern ca. 0,1 % [159]; eine Korrektur des Wägewertes - die sogenannte Korrektion - ist deshalb nur für hochgenaue Messungen notwendig.

Aufgrund der vielfältigen Wägeprinzipien und Bauarten können Waagen für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche und Anforderungen optimiert werden [102]. Die

¹ Nach DIN 1305 [63] bezeichnet der Begriff "Wägewert" das Ergebnis einer Wägung (Anzeige der Waage). Er hat die Einheit "Kilogramm". Der Begriff "Gewicht" kann sowohl anstelle von "Wägewert" als auch als Kurzform von "Gewichtskraft" gebraucht werden.

Gewichtsermittlung mit Waagen ist deshalb ein sehr häufig angewendetes Verfahren zur Mengenbestimmung von Gütern [56].

2.3.2 Gewichtsermittlung in der Landwirtschaft

Gewichtsermittlungen in der Landwirtschaft werden sowohl stationär als auch mobil durchgeführt, wobei stationäre Waagen wesentlich zahlreicher sind als mobile Systeme.

2.3.2.1 Formen der stationären Gewichtsermittlung

Für die stationäre Wägung stehen verschiedene technische Lösungen zur Verfügung (Abb. 12).

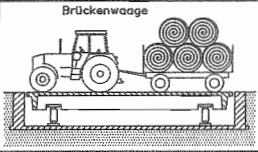
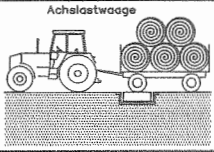
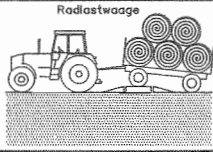
Form			
Einsatzform	stationär	stationär, aber versetzbar	versetzbar
Vorteile	ermittelt Gesamtgewicht eichfähig	In Grenzen mobil geringere Beeinträchtigung des Betriebsablaufes	kann an Stelle des Bedarfes gebracht werden
Nachteile	muß angefahren werden (stört den Betriebsablauf) teilschlagbezogene Ertragsermittlung schwierig	bedingt eichfähig kann den Betriebsablauf stören teilschlagbezogene Ertragsermittlung schwierig	stört den Betriebsablauf immer geringere Genauigkeit teilschlagbezogene Ertragsermittlung schwierig
Investitionsbedarf	20000–100000 DM	12000–40000 DM	8000–20000 DM

Abbildung 12: Möglichkeiten der Ertragsermittlung durch stationäre Wägung (nach [18, 33]).

Kennzeichnend für alle stationären Wägetechniken ist eine mehr oder weniger große Beeinträchtigung des Betriebsablaufes. Zur Gewichtsermittlung müssen die Waagen unterschiedlich weit angefahren werden, die Wägung selbst kann meistens nur bei Stillstand des Transportfahrzeugs erfolgen; eine Verringerung der Verfahrensleistung ist deshalb unvermeidbar.

Ferner kann ein Rückgang der Verfahrensleistung durch die Ausgabeform des Wägeargebnisses entstehen. Das Gewicht muß von einer Skala oder von einem Display abgelesen werden. Eine schnelle und fehlerfrei Übernahme des Gewichtswertes wird dadurch erschwert. Erforderlich wäre eine Weiterleitung des Ergebnisses auf elektronischem Wege, so daß eine problemlose Verarbeitung - vor allem im Hinblick auf eine Automatisierung - möglich würde [18, 19].

Ein weiterer Nachteil ist die eingeschränkte Realisierbarkeit einer teilschlagbezogenen Ertragsermittlung. Der Bezug zur Teilfläche, von der das gewogene Gut stammt, läßt sich nur schwer herstellen, die Größe einer Teilfläche kann nicht exakt ermittelt werden, und für einen vertretbaren Aufwand ist die Anzahl an Teilflächen möglichst niedrig zu halten. Die Teilflächen werden dadurch relativ groß, die geographische Auflösung nimmt folglich ab.

Bedeutend günstigere Voraussetzungen für eine zufriedenstellende teilschlagbezogene Ertragsermittlung bietet die mobile Gewichtserfassung.

2.3.2.2 Technische Grundlagen der mobilen Gewichtsermittlung

Technische Weiterentwicklungen in der Wägetechnik führten in den vergangenen Jahren zu einer stärkeren Verbreitung der mobilen Gewichtsermittlung. In der industriellen Wägetechnik setzten sich Wägeeinrichtungen, basierend auf dem Dehnungsmeßstreifen- (DMS-) Prinzip, insbesondere im Nennlastbereich von 10 kg bis 100 t, sowohl in Fahrzeugen, wie z.B. Gabelstapler, Lastkraftwagen oder Kränen, als auch im stationären Betrieb durch [120, 123].

Das DMS-Prinzip entspricht dem einer Federwaage, die auf dem *Hook*'schen Gesetz basiert: Ein Federkörper wird proportional zu einer einwirkenden Kraft in seiner Form verändert. Die hervorgerufene elastische Dehnung, Stauchung, Biegung oder Scherung wird von DMS aufgenommen und bewirkt bei ihm eine elektrische Widerstandsänderung, die gemessen wird und der Ableitung der einwirkenden (Gewichts-) Kraft dient [132]. Dabei wird die Widerstandsänderung mit Hilfe einer *Wheatstone*'schen Brückenschaltung ermittelt [123]. Diese Vollbrückenschaltung führt zu höheren Ausgangssignalen und damit zu einer höheren Genauigkeit, sie kompensiert zum Großteil Temperatureinflüsse und ermöglicht eine Verringerung unerwünschter Nebenkkräfte [90].

DMS werden aus Metallfolien geätzt und auf Spezialträgermaterialien aufgebracht. Es lassen sich nahezu beliebig geformte Leiterbahnen, sogenannte Meßgitter, herstellen: Meßgitter gibt es mit unterschiedlichen Nennwiderständen, in verschiedenen Formen und Größen [176]. Dadurch können sowohl sehr geringe als auch relativ große und verschiedenartige Verformungen erfaßt werden; es eröffnet sich ein breiter Anwendungsbereich. Diese Vielfältigkeit von Dehnungsmeßstreifen ermöglicht den Bau verschiedenster Sensoren und Sensorsysteme. Für die Anwendung im landwirtschaftlichen Bereich verbleiben aufgrund der notwendigen Unempfindlichkeit gegenüber Schmutz, Feuchtigkeit, extremen Temperaturen und hohen Überlastschocks die in Tabelle 5 aufgeführten Systeme.

Die **direkte Applikation** von DMS stellt die einfachste und kostengünstigste Anwendung dar. Das Sensorelement wird direkt auf das sich verformende Bauteil mit Spezialklebstoffen aufgebracht oder aufgeschweißt. Es eignet sich zur Erfassung von Scher-, Biege-, Zug- und Druckspannungen [132]. Zur Normierung und Verstärkung des vom DMS ausgegebenen Signals ist zusätzlich ein Signalaufbereitungsmodul erforderlich.

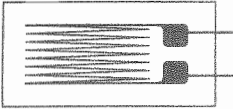
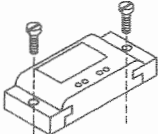

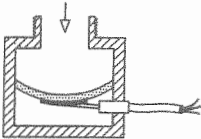
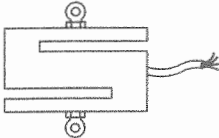
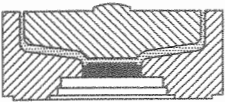
Bei **Dehnungsaufnehmern** handelt es sich um komplette Sensorsysteme auf Basis der DMS-Technik: Im Dehnungsaufnehmer befindet sich ein Federkörper, der mit DMS versehen ist. Die Anbringung dieses Sensorsystems ist im Gegensatz zum direkt applizierten DMS sehr einfach mit Schrauben durchzuführen [172]. Sie eignen sich vorzugsweise für die Ermittlung von Zug- und Druckspannungen.

Im Gegensatz zu den beiden vorherigen Wägeelementen erfassen **Bohrlochensoren** Spannungen im Inneren eines Bauteils. Sie werden kraftschlüssig in eine Bohrung gesetzt und registrieren über ihre Mantelfläche Zug- und Druckspannungen, die sie in ein kraftproportionales Signal umwandeln [172].

Lasten, die von hydraulischen Hubzylindern bewegt oder getragen werden, führen im Zylinder zu lastproportionalen Drücken, die von **Druckmeßumformern** erfaßt werden können. Die Druckmessung erfolgt mit Hilfe eines Meßkörpers, dessen Veränderung der Wandkrümmung von einem DMS registriert wird. Drucksensoren sind preiswert und verfügen sehr häufig über die Elektronik zur Signalverstärkung und -normierung.

DMS-Wägezellen bestehen aus einem Federkörper, der mit DMS bestückt ist. In Abhängigkeit vom Lastbereich, der Einbauhöhe und der Einbaulage werden unterschiedliche

Tabelle 5: Gewichtssensoren und Sensorsysteme auf DMS-Basis (nach [27, 102, 123, 132, 145, 165, 172, 176]).

Sensor/Sensorsystem	Vorteile	Nachteile
 <p>direkt applizierter DMS</p>	<ul style="list-style-type: none"> • robust • hohe Genauigkeit • kostengünstig • lange Lebensdauer • günstige Hystereseigenschaften 	<ul style="list-style-type: none"> • zeitaufwendiger und sorgfältiger Einbau notwendig • Schutz vor Umwelteinflüssen erforderlich
 <p>Dehnungsaufnehmer</p>	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Anbringung (auch nachträglich) • starkes Ausgangssignal 	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Temperaturabhängigkeit • höherer Preis
 <p>Bohrlochsensor</p>	<ul style="list-style-type: none"> • hermetisch dicht 	<ul style="list-style-type: none"> • sorgfältiger Einbau notwendig • Schwächung des Bauteils
 <p>Druckmeßumformer</p>	<ul style="list-style-type: none"> • einfache Installation 	<ul style="list-style-type: none"> • anfällig gegenüber hohen Temperaturspannen und Druckstößen
 <p>DMS-Wägezelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • viele Varianten erhältlich • hohe Genauigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • geringe Überlastfestigkeit • Einbau oft mit Konstruktionsveränderungen verbunden
 <p>elastostatische Wägezelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • vollständige Eliminierung von Seitenkräften und Biegemomenten 	<ul style="list-style-type: none"> • Einbau oft mit Konstruktionsänderungen verbunden

Meßkörperformen gewählt. Zu den bekanntesten Formen zählen Biegestäbe, Scherstäbe und Wägezellen in Dosenform [123]. Je nach Bauform werden unterschiedlich hohe Anforderungen an die Kräfteinleitung gestellt [172].

Kennzeichnend für den Aufbau von **elastostatischen Wägezellen** ist ein Kolben, der in einem Zylinder sitzt. Der enge Spalt zwischen Kolben und Zylinder ist mit einem Elastomer ausgefüllt, das bei Lasteinleitung über den Kolben einen Druck aufbaut. Der Druck wird am Fuße des Zylinders mit einem Sensor (auf DMS-Basis) ermittelt und in ein lastproportionales Signal umgewandelt. Durch diese spezielle Konstruktion haben Seitenkräfte und Biegemomente keinen Einfluß auf die Messung.

2.3.2.3 Formen der mobilen Gewichtsermittlung

Eine Zusammenstellung der Formen der mobilen Gewichtsermittlung auf DMS-Basis zeigt Abbildung 13.

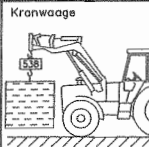
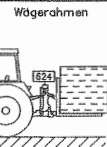
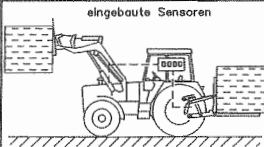
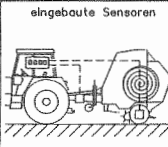
Form	Kranwaage 	Wägerahmen 	eingebaute Sensoren 	eingebaute Sensoren 
Einsatzform	mobil am Schlepper		mobil im Schlepper	mobil in der angehängten Erntemaschine
Vorteil	teischlagbezogene Ertragsermittlung bedingt möglich hohe Genauigkeit		teischlagbezogene Ertragsermittlung bedingt möglich	teischlagbezogene Ertragsermittlung möglich
Nachteil	stören den Betriebsablauf; bei Halmgut nur mit Großballen sinnvoll		geringe Beeinträchtigung des Betriebsablaufes; bei Halmgut nur mit Großballen sinnvoll; z. T. ungenau	wird in jedem Fahrzeug benötigt geringe Genauigkeit
Investitionsbedarf	4000–7000 DM		1000–5000 DM	5000–10000 DM

Abbildung 13: Möglichkeiten der Ertragsermittlung durch mobile Wägung.

Kranwaagen sind autarke Wägezellen mit einer eigenen Elektronik, Gewichtsanzeige und z.T. eigener Spannungsversorgung (Batterie, Akku). Sie dienen der Wägung von hängenden Lasten und zeichnen sich durch eine sehr exakte Gewichtsermittlung aus [102]. Nachteilig ist

das erforderliche Absteigen des Fahrers vom Schlepper zum Anhängen und zum Abnehmen der zu wiegenden Last.

Wägerahmen zählen ebenfalls zu den autarken Systemen. Sie sind ähnlich ausgestattet wie Kranwaagen und werden zwischen dem Dreipunktkraftheber am Schlepperheck und dem Anbaugerät gekoppelt. Sie bestehen meist aus parallel geführten Doppelrahmen, von denen der schlepperseitige Rahmen das geräteseitige Gegenstück über eine Wägezelle oder Scherstäbe trägt. Dadurch ist eine optimale Gestaltung der Wägeeinrichtung im Hinblick auf eine störungsfreie Gewichtsbestimmung möglich. Wägerahmen können deshalb das Gewicht relativ genau ermitteln: Beim Einsatz in der Landwirtschaft lagen die festgestellten Wägefehler¹ bei maximal $\pm 1\%$ [186]. Nachteilig ist eine Verlagerung des Anbaugerätes nach hinten und der relativ hohe Preis. In der Landwirtschaft sind Wägerahmen wenig verbreitet.

Über Einsätze von **eingebauten Sensoren** im Schlepper zur Gewichtsmessung liegen einige Untersuchungsergebnisse vor. Direkt applizierte DMS, Dehnungsaufnehmer, Bohrlochensensoren und Wägezellen wurden im Heckkrafthebergestänge erprobt [27, 170, 186]. Aus diesen Ansätzen resultierten praxistaugliche Lösungen mit Wägefehlern von etwa ± 1 bis 2% .

Einfach in der Applikation, kostengünstig, aber ungenauer sind integrierte **Druckmeßumformer** in der Schlepperdreipunkthydraulik oder im Frontlader [27, 127, 170]. Es zeigte sich, daß das Verhalten des Hydraulikdrucks sehr vielen Einflußfaktoren unterliegt und selbst bei Schleppern gleichen Typs sehr unterschiedlich ist. Probleme bereiten auch große Temperaturspannen und Druckstöße.

Eine teilschlagbezogene Ertragsermittlung ist mit Wägesystemen am oder im Schlepper bedingt möglich. Sinnvoll ist das Verfahren nur, wenn das Erntegut in Form von Gebinden bzw. Ballen vorliegt. Diese Bedingung entfällt, wenn Gewichtssensoren im angehängten Erntefahrzeug, z.B. Ladewagen, integriert sind.

Ausführliche Untersuchungen zur mobilen Gewichtsermittlung in Anhänger, Ladewagen und Rundballenpresse mit direkt applizierten DMS, Dehnungsaufnehmern und Wägezellen wurden

¹ Wägefehler können in Relation zum Meßbereichsendwert einer Waage oder zum aktuellen Gewicht angegeben werden. In der vorliegenden Arbeit beziehen sich alle Fehlerangaben auf das aktuelle Gewicht, wodurch höhere relative Fehlerangaben entstehen.

von ROTTMEIER 1996 [145] durchgeführt. Als Applikationsstellen dienten bei ein- und zweiachsigen Fahrzeugen die Achsen und deren Verbindungselemente zum Rahmen sowie die Deichsel und die Anhängerkupplung am Schlepper. ROTTMEIER ermittelte die Biegespannung an Achse und Deichsel mit DMS und Dehnungsaufnehmern, die Scherspannung an der Achse mit DMS, sowie die Druckspannung an der Achse und in der Anhängerkupplung mit Druckkraftwägezellen. Die meisten Applikationen führten zu sehr genauen Gewichtswerten. Prüfstandsergebnisse von der Rundballenpresse mit direkt applizierten DMS zur Scherspannungsmessung in der Achse und Biegespannungserfassung in der Deichsel sowie die Anwendung von Wägezellen zwischen Achse und Rahmen und in der Anhängerkupplung zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Festgestellte Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse (95 % Vertrauensbereich bei vier Durchgängen, konstante Auflagepunkte, nach [145]).

Aufnehmer	Meßgröße und -ort	Endlast [kg]	Fehler absolut [kg]	Fehler relativ [%]
DMS	Biegespannung in der Deichsel	400	1,1	0,5
DMS	Scherspannung in der Achse	900	1,8	0,5
Wägezelle	Stützlast im Zugmaul	1200	2,5	0,6

Ein von ROTTMEIER durchgeführter Praxiseinsatz mit der Rundballenpresse (Erfassung der Scherspannung in der Achse und Biegespannung in der Deichsel) bei der Strohernte mit einem Gesamtertrag von 17945 kg bei 71 Ballen ergab einen Gesamtfehler von 135 kg bzw. 0,75 % (Abb. 14).

Bei einem durchschnittlichen Ballengewicht von 253 kg wies der mittlere absolute Fehler 1,8 kg auf. Trotz dieser guten Werte traten bei einigen Ballen erhöhte Abweichungen auf: Bei knapp 2/3 der Ballen lag das ermittelte Gewicht innerhalb einer Spannweite von ± 10 kg im Vergleich zum tatsächlichen Gewicht, aber bei 13 % der Ballen traten Meßfehler von mehr als 20 kg auf; Extremwerte gingen bis annähernd 32 kg. Dies entspricht einem relativen Wägefehler von mehr als 10 %.

Eine grundlegende Voraussetzung zum Erreichen der bisher aufgeführten Wägegenauigkeiten ist der Stillstand des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Gewichtsermittlung (statische Messung). Dadurch kommt es aber zu einer Unterbrechung des Arbeitsablaufes.

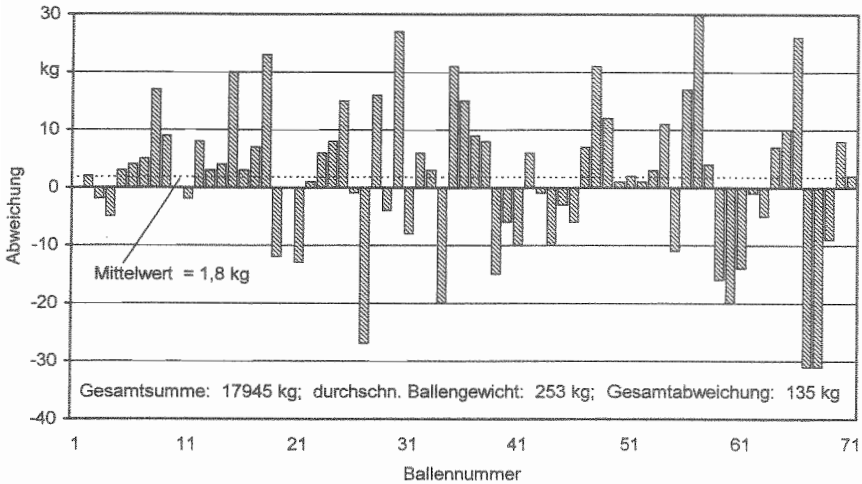


Abbildung 14: Absolute Abweichungen vom tatsächlichen Ballengewicht auf dem Flachfeld am 9.8.1992 (Wägung statisch, nach [145]).

2.3.3 Dynamische Gewichtsermittlung

Mit der dynamischen Gewichtsermittlung, d.h. mit der Wägung während der Fahrt, entfällt die Arbeitsunterbrechung zur Gewichtsmessung. Zugleich schafft eine ständige Gewichtsermittlung im Fahrzeug die Grundlage für eine hohe geographische Auflösung bei der teilschlagbezogenen Ertragsermittlung. Eine dynamische Wägung ist aber schwierig zu realisieren, da Erschütterungen und Vibration die Gewichtsermittlung stören.

2.3.3.1 Verfahren zur dynamischen Wägung

In den vergangenen Jahren wurden mehrere Verfahren zur Wägung von Fahrzeugen in Fahrt entwickelt [55, 95, 96, 110]. Diese dienen insbesondere der Gewichtskontrolle von Lastkraftwagen und der Wägung von Eisenbahnwaggons. Bei diesen Systemen befindet sich die Wägeeinrichtung nicht im Fahrzeug, sondern in der Fahrbahn. Es handelt sich also um Formen der stationären Wägung, die somit für die Gewichtsermittlung auf dem Feld nicht in Frage kommen.

CAMPBELL et al. 1994 [51] erprobten ein System zur dynamischen Gewichtsermittlung im fahrenden Kartoffelvollernter. Sie wogen kontinuierlich einen Abschnitt des Verlesebandes mit Hilfe von Wägezellen, die die Bandlaufrollen trugen. Ergebnisse zu Genauigkeitsanalysen liegen nicht vor. Die Autoren geben aber an, daß bei Messungen des leeren Bandes während des Einsatzes die Gewichtswerte um bis zu 100 % schwankten und durch eine Signalglättung (Tiefpaßfilterung) auf ca. 5 - 10 % verringert werden konnten.

Aufgrund der guten Ergebnisse bei den statischen Untersuchungen überprüfte ROTTMEIER 1996 [145] direkt applizierte DMS zur dynamischen Gewichtsmessungen in einer Rundballenpresse und in einem Ladewagen. Die Wägung basierte auf der Biegespannungsmessung in der Deichsel und der Scherspannungsermittlung in den Achsstummeln der Presse oder in der Achse des Ladewagens. Die unerwünschten Ausschläge des Gewichtssignals konnten durch eine Tiefpaßfilterung oder durch eine gleitende Mittelwertberechnung auf etwa 10 - 15 % reduziert werden. ROTTMEIER konzentrierte sich neben den Glättungsmöglichkeiten auf die Analyse wichtiger Einflußgrößen.

2.3.3.2 Untersuchte Einflußgrößen bei der dynamischen Wägung

Von der Vielzahl an Einflußgrößen bei der dynamischen Gewichtsermittlung sind vor allem Kräfte von Bedeutung, die vertikal wirken oder eine vertikale Komponente aufweisen, somit die Gewichtskraft überlagern und die Wägung stören. Diese dynamischen Kräfte entstehen durch Beschleunigungen, die von den Unebenheiten der überfahrenen Fahrbahn und von den Bewegungen der Maschinenbauteile verursacht werden. Wie die Untersuchungen von ROTTMEIER 1996 [145] zeigen, führen diese Einflüsse zu Gewichtsanzeigen, die das zwei- bis dreifache der tatsächlichen Last betragen. Die registrierten Beschleunigungsamplituden waren dabei an der Deichsel teilweise mehr als doppelt so hoch wie an der Achse, wobei Maximalbeschleunigungen (zusätzlich zur Erdbeschleunigung) von ± 2 g auftraten. Der Grund für die höheren Werte an der Deichsel liegt nach ROTTMEIER am Zusammenwirken der Beschleunigungskräfte des angehängten Fahrzeugs und des Schleppers sowie an der geringeren Dämpfung.

Untersuchungsergebnisse von WENDEBORN 1965 [184] zeigen, daß die Höhe der Beschleunigungen von der Fahrbahnart (und damit von den Bodenunebenheiten) wesentlich stärker beeinflusst wird als von der Fahrgeschwindigkeit. Erwartungsgemäß steigen die Beschleunigungsamplituden mit zunehmendem Ausmaß der Unebenheit. Die Fahrzeugreifen gleichen

Unebenheiten bis zu einem gewissen Grad aus und haben deshalb eine dämpfende Wirkung auf die dynamische Wägung. Die Dämpfung wird umso stärker, je größer das Reifenvolumen ist [98].

ROTTMEIER 1996 [145] stellte deutliche Unterschiede in den Größen der Beschleunigungskräfte zwischen dem Ladewagen und der Rundballenpresse fest. Bei ausgeschalteter Maschine waren beim Ladewagen die ermittelten Beschleunigungen etwa doppelt so hoch wie bei der Rundballenpresse. Der Betrieb mit der Zapfwelle führte beim Ladewagen zu keinen gravierenden Änderungen der Beschleunigungswerte, bei der Rundballenpresse nahmen sie aber erheblich zu. Als Ursache nennt ROTTMEIER die größere Masse der Teile der Rundballenpresse, die beim Betrieb bewegt werden.

2.3.3.3 Störgrößenkompensation

In den vergangenen Jahren wurden einige Anstrengungen unternommen, um die bei der dynamischen Gewichtsermittlung auftretenden Störschwingungen und unerwünschter Nebenkräfte zu kompensieren. Dabei handelte es sich um bauliche Veränderungen an der Maschine, Anwendung mathematischer Algorithmen zur Signalglättung und die meßtechnische Erfassung der Störgrößen mit Hilfe derer das Gewichtssignal bereinigt werden sollte.

Maschinenbauliche Maßnahmen

Einen Ansatz zur Entkopplung von unerwünschten Nebenkräften bietet die Doppelrahmenbauweise bei Maschinen. Dies zeigen Ergebnisse bei der Wägung mit Wägerahmen im Schlepperheckkraftheber und bei der Gewichtsermittlung im Düngerstreuer [7, 39, 146, 186]. Wie bereits erwähnt ist mit dem Doppelrahmen eine optimale Gestaltung der Wägeeinrichtung im Hinblick auf eine optimale Krafteinleitung möglich. Aufgrund des hohen technischen Aufwandes wurden derartige Lösungen für Ladewagen oder Rundballenpresse noch nicht in Erwägung gezogen.

Signalglättung mit mathematischen Algorithmen

Zur Glättung dynamischer Gewichtssignale auf mathematischer Basis wurden bereits eine Vielzahl von Methoden entwickelt [55, 95, 96, 110, 142, 185]. Diese können aber nur bedingt

auf die teilschlagbezogene Ertragsermittlung übertragen werden, weil sie sich auf Wägeeinrichtungen in der Fahrbahn und nicht im Fahrzeug beziehen.

ROTTMEIER 1996 [145] überprüfte digitale Filter und Mittelwertberechnungen zur Glättung von Wägewerten in der Rundballenpresse. Grundlage einer digitalen Filterung ist die Kenntnis des Frequenzspektrums des ermittelten Gewichtssignals. Analysen ergaben, daß die durch Bodenunebenheiten verursachten vertikalen Beschleunigungen vor allem in einem Frequenzbereich von 0 bis 20 Hz liegen [184]. Die Amplituden weisen unterschiedliche Höhen auf, wobei die Peakamplituden unterhalb von 5 Hz auftreten. ROTTMEIER 1996 [145] konzentrierte sich bei der Rundballenpresse auf den Spektralbereich von 0 bis 10 Hz und stellte bei Fahrten mit eingeschalteter Presse hohe Amplituden bei etwa 2 und 4,5 Hz fest. Er glättete daraufhin die Rohsignale, die bei einem Versuch mit konstantem Gewicht ermittelt wurden, mit einem *Butterworth*-Tiefpaßfilter und einer Grenzfrequenz von 0,5 Hz. Die resultierende Signalkurve wies dennoch eine Signalspannweite bzw. einen Fehler von 30 bis 100 kg auf. Als Ursache für die verbleibenden Abweichungen nennt ROTTMEIER den hohen Anteil nicht-periodischer Schwingungsanteile, die bei einer digitalen Filterung unberührt bleiben. Ungeklärt blieb die Frage, inwieweit die relativ niedrigen Datenerfassungsraten von 4 oder 18 Hz bei den Versuchsfahrten sich in den Ergebnissen bemerkbar machten.

Bei den Mittelwertberechnungen lag der Schwerpunkt auf der Ermittlung des gleitenden Mittelwerts. ROTTMEIERS Angaben zufolge verringerten sich die dynamischen Störungen auf ca. 15 %. Die Anwendung dieser Methode ist aber fraglich, da die Amplitudenhöhen der Störschwingungen ("Rauschen") teilweise größer sind als die Nutzsignalthöhen [111, 129]. Gleitende Mittelwertberechnungen sind in der Regel nur bei einem großen Nutzsignal-zu-Rauschen-Verhältnis sinnvoll.

Meßtechnische Erfassung der Störschwingungen

Neben der rein mathematischen Signalglättung besteht die Möglichkeit, die Störschwingungen zu erfassen und die gewonnen Meßwerte zur Korrektur der Gewichtssignale heranzuziehen.

Ein Verfahren zur Störgrößenermittlung beruht auf der Verwendung einer Referenzmasse mit bekanntem Gewicht, das kontinuierlich gemessen wird [167]. Die festgestellten, mehr oder weniger starken Abweichungen vom tatsächlichen Gewicht wären die Fehler der Gewichtsermittlung, mit deren Hilfe die Gewichtswerte der zu wiegenden Lasten korrigiert werden

könnten. Der Einsatz eines derartigen Systems ist an zwei Voraussetzungen gebunden: Zum einen werden zwei identische Wägesysteme - eines für die Referenzmasse, das andere für die zu wiegenden Lasten - benötigt, zum anderen müssen auf beide Wägeeinrichtungen die gleichen Störeinflüsse wirken. Da diese Voraussetzungen nicht immer gegeben sind, ist die Anwendung dieses Verfahrens erheblich eingeschränkt. Zusätzlich ist die Realisierung dieses Dualwägesystems oft nur mit einem erheblichen technischen und finanziellen Aufwand möglich.

Ein zweites Verfahren baut auf Beschleunigungssensoren auf. Diese könnten die in einem Fahrzeug auftretenden störenden Vertikalbeschleunigungen erfassen und somit die Korrekturinformationen für die Wägung bereitstellen. ROTTMEIER 1996 [145] überprüfte diesen Ansatz für die Rundballenpresse, aber die visuell ermittelten Korrelationen zwischen Gewichts- und Beschleunigungssignalen waren nicht besonders ausgeprägt. Während an der Achse noch eine größere Abhängigkeit zwischen beiden Signalen festzustellen war, ließen sich an der Deichsel nur unbedeutende Zusammenhänge erkennen. Eine Meßortveränderung des Beschleunigungssensors auf der Achse zeigte keine Auswirkungen auf die Korrelation von Gewichts- und Beschleunigungssignal. ROTTMEIER führt dazu an, daß die bei seinen Versuchen verwendeten Erfassungsraten von 4 und 18 Hz für Analysen dieser Art zu niedrig wären.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bei der dynamischen Wägung zur Ertragsermittlung mit den gegenwärtig verfügbaren Meßsystemen sehr große Fehler zu verzeichnen sind. Desweiteren liegen keine sicheren Ergebnisse zu systematischen Untersuchungen über störende Einflußgrößen vor.

2.3.4 Lokale Ertragsermittlung und -kartierung

Nach AUERNHAMMER 1994 [20] ist der lokale Ertrag eine Funktion mit den drei Variablen Ertragswert, Bezugsfläche und Position, die selbst von acht Größen abhängen (Abb. 15).

Als Meßsystem für lokale Futtererträge käme z.B. die dynamische Wägung mit Sensoren in der Erntemaschine in Frage. Wie die vorausgehenden Erläuterungen zeigen, bietet gegenwärtig dieses System die besten Ansätze.

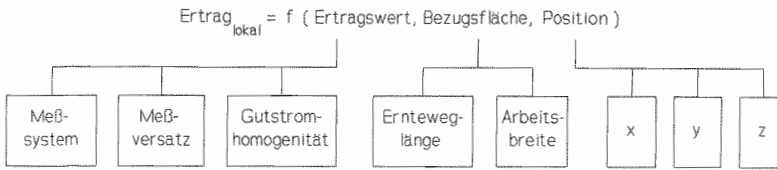


Abbildung 15: Abhängigkeiten der lokalen Ertragsermittlung (nach [20]).

Bei Futtererntemaschinen erwartet AUERNHAMMER 1994 [20] keinen zeitlichen Meßversatz. Ein räumlicher Versatz ist dagegen nicht auszuschließen, denn die Messung bei der Erntegutaufnahme kann an einer anderen Stelle stattfinden, als am Ort des Erntegutschnittes. Beim Mähdrusch kann in Abhängigkeit vom jeweiligen Mähdrescher mit einer Verlagerung des Stroh in Fahrtrichtung gerechnet werden. Gravierendere Verfrachtungen könnten bei der Ernte von Heu oder Anwelkgut vorkommen, da das Gras nach dem Mähen gezettet, mehrmals gewendet und geschwadet wird. Untersuchungsergebnisse zu diesen Verlagerungen konnten in der Literatur nicht gefunden werden.

Kritisch ist auch die Gutstromhomogenität zu betrachten. Vor allem bei Anwelkgut kann der Feuchtigkeitsgehalt zu starken Verfälschungen führen. Bei Untersuchungen zum Trocknungsverlauf von Grüngut stieg der Trockenmassegehalt in einer Stunde um mehr als 10 %-Punkte [164]. Eine Ertragsermittlung ist deshalb nur in Kombination mit einer kontinuierlichen Feuchtemessung sinnvoll. Für die Ermittlung der Feuchte gibt es eine Vielzahl an Meßmethoden [104], die im Hinblick auf den Einsatz in der Landwirtschaft verschiedene Vor- und Nachteile aufweisen [115, 143]. Einige Hersteller bieten bereits Feuchtemeßsysteme für Futtererntemaschinen an [115]. Über deren Tauglichkeit und Genauigkeit liegen derzeit keine ausführlichen wissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse vor.

Für die Ermittlung der Ernteweglänge, die einen Parameter für die Bezugsfläche darstellt, gibt es bereits eine Reihe von technischen Möglichkeiten. Bewährt haben sich Sensoren auf Basis von Ultraschall oder Radar, da ihre Geschwindigkeits- bzw. Wegmessungen vom Reifenschlupf nicht beeinträchtigt werden [32, 73, 116]. Neben der Streckenmessung ist auch eine exakte Erkennung von Anfang und Ende der Ernteweglänge, z.B. Schwad Anfang-/ende, nötig. Beim Ladewagen oder bei der Rundballenpresse ist noch keine Anfangs-/Enderkennung realisiert, beim Mähdrusch erfolgt sie z.B. mit Hilfe einer Lichtschranke auf dem Schneidisch oder über die Ermittlung der Schneidischstellung mit einem Grenztafter [62].

Die Arbeitsbreite bzw. die Bezugsflächenbreite ergibt sich bei der lokalen Ertragsermittlung für Stroh in der Regel aus der tatsächlichen Arbeitsbreite des Mähdreschers, die berührungslos gemessen werden kann [140, 179]. Die Arbeitsbreitenwerte müssen deshalb für eine lokale Strohertragsermittlung gespeichert werden. Bei Heu oder Anwelkgut gestaltet sich die Ermittlung der Bezugsflächenbreite erheblich schwieriger. Die Breite der Fläche, über die der Schwad gebildet worden ist, kann zum Zeitpunkt des Aufladens oder Pressens nur geschätzt werden.

Die dritte Variable der lokalen Ertragsfunktion ist die Position des Meßortes. Möglichkeiten zur Ermittlung der Position (geographische Länge, geographische Breite und Höhe) wurden bereits näher dargestellt.

Schließlich kann anhand der Variablen der lokale Ertrag über die Funktion ermittelt und eine Ertragskarte erstellt werden. Dazu werden in einem GIS alle Daten zusammengeführt und die lokalen Ertragswerte mit einfachen oder komplexeren statistischen Methoden berechnet [53, 62, 85, 138, 162, 179]. Die Ergebnisdarstellung erfolgt in Form von Raster- oder Konturkarten (Isoertragslinienkarten). Die zu wählende Rastergröße hängt von einer Reihe von Faktoren ab [85], ebenso die zu bestimmende Ertragsklassenbreite. Während beim Mähdrusch eine Klassenbreite von 10 dt/ha und mehr, als Rastergröße 25 x 25 m und darüber genannt werden, liegen für die Futterernte keine Angaben vor [20].

3 Zielsetzung

Der Literaturüberblick zeigt, daß die gegenwärtig existierenden technischen Lösungen zur Erfassung von Arbeitszeit- und lokalen Ertragsdaten im Futterbau den Anforderungen nicht gerecht werden. Datenquantität und -qualität sind entweder unbefriedigend oder der Aufwand für eine exakte Erfassung ist zu hoch.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Datenerfassungssystem aufzubauen und zu bewerten, mit dem präzise und qualitativ hochwertige Informationen über die Arbeitszeit und den lokalen Ertrag gewonnen werden können. Das neue Verfahren soll möglichst automatisiert ablaufen, damit der bisher z.T. sehr hohe personelle Aufwand minimiert wird und der durch die Arbeitsverrichtung belastete Mensch als Fehlerquelle bei der Erfassung wegfällt.

Das Erfassungssystem soll aufgrund der Bedeutung von Informationen für eine ökonomisch und ökologisch orientierte Betriebsführung in erster Linie für den alltäglichen Einsatz auf dem praktischen landwirtschaftlichen Betrieb ausgerichtet sein. Dabei soll auf eine einheitliche Datenbasis geachtet werden, damit Ergebnisse auch den Anforderungen aus Wissenschaft und Beratung gerecht werden und objektiv vergleichbar bleiben.

Als die "neue" Grundgröße soll der Ort der Datenerfassung in das System eingehen, so daß jeder Meßwert mit den exakten geographischen Koordinaten seines Erhebungsortes versehen werden kann.

Auf Futterbaubetrieben fällt der Rundballenpresse eine zentrale Stellung zu. Das Erfassungssystem soll deshalb beispielhaft an dieser Maschine realisiert werden.

Für ein übersichtliches und systematisches Vorgehen soll die praktische Verwirklichung und Bewertung über drei Teilziele erreicht werden:

1. Positionsermittlung

In diesem Abschnitt ist ein Erfassungssystem aufzubauen, das die Positionsdaten ermittelt und das zur Erhebung der Arbeitszeitwerte und lokalen Erträge erweitert werden kann. Für die Positionsermittlung wird GPS eingesetzt. Da sich die grundsätzliche Eignung des GPS zur Ortung in der landwirtschaftlichen Praxis bereits erwiesen

hat, sollen mit den eigenen Untersuchungen die noch wenig bekannte Ortungsgenauigkeit, Verfügbarkeit und Kontinuität im dauerhaften Einsatz und Einflußgrößen auf die Exaktheit der Positionsermittlung überprüft werden.

2. Arbeitszeiterfassung

Den Anschluß soll die Erweiterung des Erfassungssystems für die zusätzlichen Daten bilden. Mit einer geeigneten Sensorikergänzung der Rundballenpresse soll eine Basis für eine kausale Arbeitszeitanalyse ohne einen Zeitnehmer vor Ort geschaffen werden. Dabei ist auf eine einheitliche Datenbasis zu achten, damit auch finale Betrachtungen möglich sind. Die Einflußgröße "Ertragshöhe" soll durch die Ertragsermittlung zur Verfügung gestellt werden. Als Zeitgeber für die Zeitmessungen ist GPS heranzuziehen. Zur automatisierten Gewinnung der Arbeitszeitinformationen aus den erhobenen Daten sollen Analysealgorithmen entwickelt und in einem bedienerfreundlichen Computerprogramm implementiert werden.

3. Ertragsermittlung

Zuerst soll das Erfassungssystem für die Ermittlung lokaler Ertragsdaten erweitert werden. Dies soll mit integrierten Sensoren auf DMS-Basis zur dynamischen Wägung erfolgen. Auf einen definierten Wägefehler als Zielgröße wird dabei verzichtet. Es soll vielmehr überprüft werden, inwieweit das von ROTMEIER 1996 [145] entwickelte System verbessert werden kann. Dabei sollen störende Einflußgrößen identifiziert und Möglichkeiten der Signalfilterung und -glättung gefunden werden. Zusätzlich sollen an verschiedenen Orten in der Rundballenpresse die auftretenden Beschleunigungen mit einer hohen Aufzeichnungsrate gemessen und die gewonnenen Werte mit den Wägewerten zu deren Bereinigung verrechnet werden. Neben den Gewichtswerten sind die Ernteweglängen und Bezugsflächenbreiten zu ermitteln. Dazu sollen die Daten von der kausalen Arbeitszeitermittlung herangezogen werden. Nach der Zusammenführung mit den Positionswerten in einem GIS sind schließlich Ertragskarten zu erstellen.

4 Positionsermittlung

Wie der Überblick über den gegenwärtigen Stand der Ortungstechnik zeigt, bietet GPS die besten Voraussetzungen für eine einfache, kontinuierliche und genaue Erfassung der Fahrzeugposition. Außerdem ist es das einzige System, das neben der Position auch die exakte Uhrzeit ausgeben kann. Es wurde deshalb für die eigenen Untersuchungen ausgewählt.

4.1 GPS als Basis für die automatisierte Prozeßdatenermittlung

GPS-Empfänger weisen in der Regel eine Schnittstelle auf, über die eine Weitergabe der ermittelten Daten an einen Rechner problemlos möglich ist. Sie erfüllen damit eine Grundvoraussetzung für die Integration in ein automatisiertes Prozeßdatenerfassungssystem.

Da GPS-Empfänger auch Uhrzeit und Datum ausgeben, können Meßwerte jeglicher Art zeitlich zugeordnet werden. Basis dafür ist das GPS-eigene, hochgenaue Zeitsystem.

4.1.1 GPS zur zeitlichen Zuordnung von erfaßten Daten

Für die Positionsermittlung mit Hilfe der Signallaufzeitmessung müssen alle Satelliten über die selbe, möglichst exakte Uhrzeit und damit über das selbe Zeitsystem verfügen. Aufgrund von Schaltsekunden kann das für bürgerliche und wissenschaftliche Zeitangaben weltweit gültige und hochgenaue Zeitsystem "UTC (Universal Time Coordinated, deutsch: koordinierte Weltzeit)" nicht als GPS-Zeitsystem fungieren. Systembedingt ist bei GPS ein Einfügen von Schaltsekunden, das aufgrund der sich verlangsamenden Erdrotation erforderlich wäre, nicht möglich [106]. Deshalb wurde für GPS ein eigenes Zeitsystem geschaffen.

Die Zeitverschiebung infolge der Schaltsekunden ist der alleinige Grund für die Unterschiede zwischen beiden Zeiten, da sowohl die GPS-Zeit als auch UTC als Einheit die SI-Sekunde und die gleiche Skala aufweisen [38]. Weil die Differenz zwischen beiden Zeitsystemen bekannt ist (die GPS-Zeit läuft gegenwärtig der UTC um etwa 12 Sekunden voraus [108]), wird von den meisten GPS-Empfängern dieser Unterschied berücksichtigt und die Zeit in UTC ausgegeben.

Abgeleitet von der UTC sind die Zonenzeiten, von denen für Mitteleuropa die "Mitteleuropäische Zeit (MEZ)" gilt. Gegenüber der UTC läuft die MEZ eine Stunde, während der Sommerzeit zwei Stunden, voraus.

Aufgrund der bekannten und verhältnismäßig konstanten Differenz zwischen der GPS-Zeit und der MEZ bilden die Zeitangaben eines GPS-Empfängers eine gute Grundlage für eine relativ genaue zeitliche Zuordnung von Meßwerten jeglicher Art.

4.1.2 Methodik und Versuchsdurchführung

4.1.2.1 Ortungstechnik

Gegenwärtig gibt es weltweit über 60 Firmen (davon ca. 50 in den USA), die etwa 400 verschiedene GPS-Empfänger herstellen [11]. Die Empfangsgeräte unterscheiden sich hauptsächlich durch folgende Kennzeichen:

- Anwendungsbereich und -umgebung, Benutzergruppe und Einsatzzweck (Positionsermittlung, Vermessung, Navigation, Zeitmessung)
- Ortungsfehler (1 cm bis ca. 100 m)
- Signalakquisition/-verarbeitung (sequentiell, parallel, Multiplexverfahren)
- Kanalanzahl (1 bis 24)
- Signalempfang (Ein-Frequenzempfänger: L_1 , Zwei-Frequenzempfänger: L_1 und L_2 ; C/A-Code; P-Code; Y-Code; Phaseninformation; GLONASS)
- Kaltstart¹ (40 s bis 6,5 h)
- Warmstart² (5 s bis 30 min)
- Reakquisition³ (0,1 s bis 3 min)
- Datenausgabeintervall (0,05 s bis 9.999 s; meistens veränderbar)
- Preis (200,- US \$ bis 40.000,- US \$)

Empfänger, die bei der Signalakquisition parallel arbeiten, weisen mehrere Empfangskanäle auf. Dadurch können sie mit jeweils einem Kanal die Signale eines Satelliten ständig

¹ Zeit zwischen Einschalten und erster Positionsabgabe; Ephemeriden, Almanachdaten, Position und Uhrzeit unbekannt;

² Zeit zwischen Einschalten und erster Positionsabgabe; Empfänger hat aktuelle Almanachdaten und Zeit sowie Ursprungsposition; Ephemeriden unbekannt;

³ Zeit bis zur Ausgabe der aktuellen Position nach Signalverlust (Signalverlust länger als 1 min);

empfangen [106]. Je größer die Anzahl der Kanäle, desto umfangreicher ist das Angebot an Satelliten, aus dem die vier für die Ortung ausgewählt werden. Eine Steigerung der Anzahl an Kanälen führt folglich zu einer höheren Ortungsgenauigkeit. Mit Ausnahme von Spezialanwendungen sind für einen Empfänger etwa zehn Kanäle ausreichend, da nicht mehr Kanäle als sichtbare Satelliten zur Verfügung stehen müssen.

Auf Basis der in Tabelle 3 aufgestellten Anforderungen wurden zwei verschiedene, höherwertige, handelsübliche DGPS-Empfängersysteme für die Untersuchungen ausgewählt (Tab. 7).

Tabelle 7: Kenndaten der verwendeten GPS-Empfängersysteme.

	System A		System B	
	Feststation	Mobilempfänger	Feststation	Mobilempfänger
Hersteller	Novatel, Kanada	Furuno, Japan	Ashtech, USA	Ashtech, USA
Typ	GPSCard 2121R	GN-72	M XII	M XII
Herstellungsjahr	1993	1993	1992	1992
Kanalanzahl	10	8	12	12
Empfang von	L ₁ , C/A	L ₁ , C/A	L ₁ , C/A	L ₁ , C/A
zusätzliche Auswertung von	Phaseninformation	-	Phaseninformation Doppler-Effekt	Phaseninformation Doppler-Effekt
Kaltstart	< 2 min	< 15 min	< 5 min	< 5 min
Warmstart	k.A.	< 45 s	k.A.	k.A.
Reakquisition	5 s	k.A.	k.A.	k.A.
Differentieller Betrieb	Echtzeit		Echtzeit/Post Processing	
Datenformat der Korrekturinformation	RTCM SC-104		RTCM SC-104 Ashtech	
Datenspeicher	-	-	2 MB	2 MB
Anschaffungspreis	6.000,- DM	1.500,- DM	27.500,- US \$	27.500,- US \$
k.A. keine Angabe				

Die Stromversorgung der Mobilempfänger erfolgte über das 12 V-Schlepperbordnetz, die Feststationen wurden über ein Netzgerät versorgt, das die 230 V der öffentlichen Stromversorgung auf die notwendige 12 V-Spannung transformierte.

Den systematischen Aufbau des DGPS-Systems A zeigt Abbildung 16.

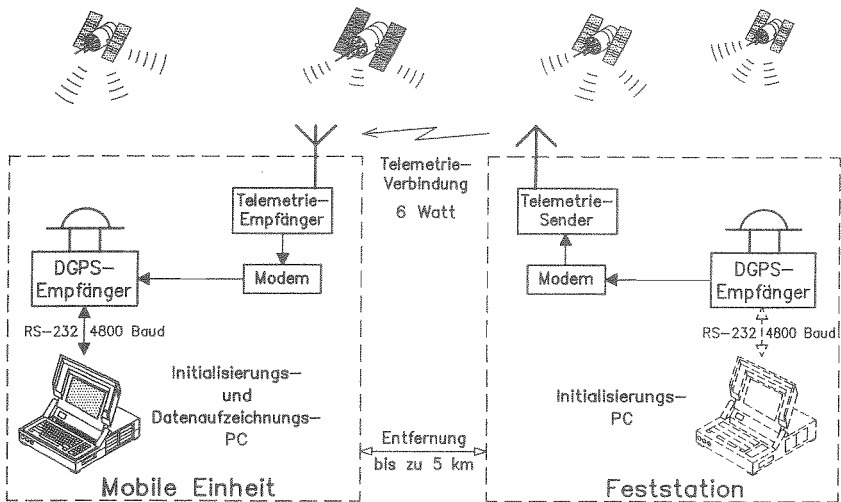


Abbildung 16: Schematischer Aufbau der eingesetzten DGPS-Anlage (System A).

Die Anlage wurde auf einem landwirtschaftlichen Privatbetrieb in Neuhausen bei Erding, Oberbayern, aufgebaut. Dort fanden auch die Untersuchungen statt.

Der mobile Empfänger war auf einem der Betriebsschlepper (FENDT, Typ 306 LSA Turbomatik) installiert. Die Anbringung der Antenne (FURUNO, Typ Au-6) erfolgte auf dem Dach der Kabine. Eine mittige Befestigung war aufgrund der Gegebenheiten nicht möglich, die Antenne befand sich deshalb 63 cm links von der Fahrzeuginnenachse. Ein Industrie-PC (KONTRON, Modell IP LITE 386) mit 4 MB Arbeitsspeicher, 33 MHz Taktfrequenz, 200 MB Festplatte und mathematischem Coprozessor zeichnete die vom GPS-Empfänger kommenden Daten (einschließlich der korrigierten Positionsangaben) auf. Der PC diente auch zur Initialisierung des GPS-Empfängers. Ein Rechteckwandler transformierte die 12 V-Bordspannung zur Versorgung des Rechners auf 110 V hoch.

In einer Maschinenhalle war die Feststation untergebracht; auf deren Dach befand sich die dazugehörige Antenne (NOVATEL, Modell 521). Die Übertragung der ermittelten Korrekturinformation von der Feststation zum Mobilempfänger erfolgte über ein Modem (MOBILE DATA COMMUNICATION, Dänemark, Typ MDC-311) und ein Funkgerät (MOTOROLA, Modell MC micro) auf einer Frequenz von 469,61 MHz mit einer Sendeleistung von 6 Watt. Zur Initialisierung der Feststation diente ein PC. Auf eine exakte Bestimmung des

Stationsstandortes durch Geodäten wurde verzichtet, da eine hochgenaue, absolute Einordnung der Positionsdaten in ein Koordinatensystem für die Untersuchungen nicht erforderlich war und eine derartige Vermessung hohe Kosten verursacht. Stattdessen wurde durch eine Mittelung der Positionsdaten einer mehrstündigen Aufzeichnung mit einem der beiden ASHTECH-Empfänger der Standort der Feststation errechnet.

Die beiden ASHTECH-Empfänger des Systems B waren identisch. Die Signale wurden bei der Feststation über eine hochwertige Antenne für geodätische Anwendungen (ASHTECH, Typ Precision Antenna) empfangen, bei der Einheit auf dem Fahrzeug über eine preisgünstigere Antenne für mobile Anwendungen (ASHTECH, Typ Kinematic Antenna). Feststation und Mobileinheit waren an den selben Stellen installiert wie im System A. Da die Positionsdatenkorrektur im Post Processing erfolgte, war eine Telemetrie Verbindung nicht erforderlich. Stattdessen verfügten die beiden ASHTECH-Empfänger über einen Speicher (RAM), der die ermittelten Werte aufnahm. Die gespeicherten Daten wurden mit Hilfe eines PC über eine RS-232-Schnittstelle aus den beiden Empfängern zur nachträglichen Korrektur ausgelesen.

4.1.2.2 Versuchsdurchführung

Im ersten Schritt der Versuchsdurchführung erfolgte die Inbetriebnahme der NOVATEL-Feststation zu Beginn der Grünfütterbergung im Frühjahr. Die Initialisierungsdaten (Einstellung auf differentiellen Modus, Standortkoordinaten der Feststation, Format der Korrekturinformation, geographisches Datum, Häufigkeit der Datenausgabe usw.) wurden per Hand über den PC in den Feststationsempfänger eingegeben. Danach gab die Anlage alle 2 s eine Korrekturmeldung im RTCM SC-104-Format [147] aus. Sie blieb während der gesamten Vegetationsperiode rund um die Uhr in Betrieb.

Die ASHTECH-Feststation wurde nur gestartet, wenn bei Maschineneinsätzen die Positionsdaten zusätzlich mit dem ASHTECH-System ermittelt werden sollten. Eine Initialisierung war bei diesem Empfängertyp nicht erforderlich, die Anlage begann kurz nach dem Einschalten selbstständig mit der Datenerfassung und der internen Datenspeicherung.

Zur Initialisierung der FURUNO-Mobileinheit und zur Datenaufzeichnung auf dem Fahrzeug wurde das Programm "rb" (© K. Wild 1995, entwickelt mit der Programmiersprache C, Version 5.1, von MICROSOFT) eingesetzt. Da der GPS-Empfänger beim Ausschalten die

übermittelten Initialisierungsdaten verlor, wurde zu Beginn jeder Aufzeichnung die Initialisierung automatisch neu durchgeführt. Die vom GPS-Empfänger ausgegebenen Daten wurden im ASCII-Format mit einer Aufzeichnungsrate von 1 Hz auf der Festplatte des PC gespeichert und zusätzlich zur Vermeidung von eventuellen Datenverlusten durch "rb" in einer komprimierten Form gesichert.

Durch Drücken einer Taste am PC wurde das Erfassungsprogramm vom Schlepperfahrer gestartet und beendet. Ansonsten war keinerlei Bedienung erforderlich. Die Aufzeichnung der Daten begann unmittelbar nach dem Anlassen des Schleppers und wurde nach Abschluß der Arbeit kurz vor dem Abstellen des Schleppers beendet. Der Arbeitsablauf wurde durch die Datenaufzeichnung in keiner Weise unterbrochen oder gestört.

Beim ASHTECH-Mobilempfänger begann die Ermittlung und die Abspeicherung der Positionsdaten automatisch nach dem Einschalten des Gerätes. Die Aufzeichnungsrate betrug 0,5 Hz.

Erfaßt wurden Einsätze einer Rundballenpresse (JOHN DEERE, Typ 550). Da der Schlepper während der Grünfütterperiode zum täglichen Eingrasen verwendet wurde, konnten auch bei diesen Einsätzen die Positionsdaten aufgezeichnet werden. Der Schlepper stand meistens unter dem mit Stahlblech bedeckten Vordach einer Scheune. Von dort aus startete der Fahrer zu den einzelnen Schlägen (Hinfahrt), wobei der erste Teil des Weges überwiegend der selbe war: Von der Hofstelle in Neuhausen auf einer Kreisstraße Richtung Norden bis zum Ort Ammerfeld (900 m) und weiter auf der Kreisstraße östlich in Richtung zur Ansiedlung Flanning. Nach 900 m hatte der Fahrer die Wahl weiter Richtung Osten zu fahren oder rechts abzubiegen. Beide Wege führten zu den Schlägen. Nach der Arbeitserledigung auf dem Feld ging es den selben Weg zurück zur Hofstelle.

Während die Strecke von Neuhausen nach Ammerfeld ohne Randbepflanzung ist, handelt es sich bei der weiteren Trasse von Ammerfeld Richtung Flanning bis zur Abzweigung um eine Allee. Die Bepflanzung mit Ahornbäumen ist etwa 20 Jahre alt. Die Bäume sind im Durchschnitt ca. 10 m hoch, ihre überwiegend kugelförmigen Kronen haben einen Durchmesser von ungefähr 7 m, der Abstand zwischen den einzelnen Bäumen in Fahrtrichtung beträgt etwa 15 m. Aufgrund der Größe der Bäume und einer Straßenbreite von 6 m erstrecken sich die Äste vom Straßenrand hinein bis über die Fahrbahnmitte. Die Allee weist auch Baumlücken auf, wobei diese vor allem im östlichen Abschnitt auftreten.

4.2 Datenweiterverarbeitung und -analyse

Zur Weiterverarbeitung wurden die auf dem Erfassungsrechner zwischengespeicherten Daten des FURUNO-Empfängers mit Hilfe einer Diskette auf einen Büro-PC übertragen. Bei den ASHTECH-Empfängern erfolgte der Transfer über die serielle Schnittstelle.

Die vom FURUNO-Empfänger ausgegebenen Daten lagen in dem in Tabelle 8 dargestellten Format vor.

Tabelle 8: Format einer GPS-Datenzeile des FURUNO-Empfängers.

```

$GPGGA,162336,4817.329,N,01156.153,E,2,07,02.85,0495,M,0047,M

```

The diagram illustrates the structure of the GPS data line with the following labels:

- String-Code
- Uhrzeit
- Geographische Länge
- Geographische Breite
- GPS-Status
- Anzahl der Satelliten
- PDOP
- Höhe über NN
- Geo-dätische Kennzahl

Da der GPS-Empfänger mehrere Formate ausgeben kann, erscheint als erstes der Code für den jeweiligen Zeilentyp (String-Code). Die Uhrzeit wird im Format *hhmmss* in UTC dargestellt. Die Koordinatenangabe erfolgt in geographischer Länge (N für Nord) und Breite (E für engl. East, deutsch: Ost) im WGS 84-Format. Die Koordinaten sind in Grad und Minuten mit drei Nachkommastellen (*GGMM.mmm*) angegeben. Bei der Statusmeldung bedeutet "2" DGPS, "1" GPS im Standardmodus und "0" steht für "keine Positionsermittlung". Anschließend folgt die Anzahl der Satelliten, deren Signale empfangen werden. Die Angabe der Werte für den PDOP erfolgt mit zwei Dezimalstellen. Die Höhenangabe ist in Meter über Normal-Null. Den Abschluß bildet eine geodätische Kennzahl.

- GPS-Empfänger
- Erfassungszeitraum (mehrere Stunden / sechs Monate)
- Erfassungsort (Straße ohne Randbepflanzung / Allee)
- Post Processing-Computerprogramm

Zur Ermittlung von Unterschieden in der Anzahl erfaßter Satelliten und in den PDOP-Werten auf unterschiedlichen Strecken wurde STUDENTS *t-test* herangezogen [148]. Die Beurteilung der Ortungsgenauigkeit erfolgte mit Hilfe visueller Analysen der Fahrspuren, wobei *AutoCad* zur Messung von Abweichungen diente.

4.3 Ergebnisse

Datenaufzeichnungen vom Eingrasen konnten für 130 Tage des Jahres 1994 analysiert werden. Bei der Rundballenpresse wurden Einsätze auf zwei Schlägen ausgewertet.

Das Eingrasen erstreckte sich vom 15.5.1994 bis zum 13.11.1994 (183 Tage). In diesem Zeitraum stand an 28 Tagen kein Erfassungsrechner zur Verfügung. Bei der Ortungstechnik traten keine Ausfälle auf. Der verwendete Empfänger von FURUNO erwies sich als robust und den harten Einsatzbedingungen in der Landwirtschaft gewachsen. Wackelkontakte beim Datenkabelanschluß an der Festplatte des Industrie-PCs verhinderten die Aufzeichnungen an fünf Tagen. Von den verbleibenden 150 Tagen mit Datenerfassung konnten die 130 Aufzeichnungen für die Ergebnisdarstellungen verwertet werden, bei denen der Schlepper überwiegend den selben Weg zu den Schlägen und zurück nahm (130 Hin- und 130 Rückfahrten).

Bei den beiden Einsätzen der Rundballenpresse auf zwei Wiesen ("Angerwiese", 3,6 ha, am 21.9.1993 und "Grafwiese", 1,5 ha, am 29.6.1995) arbeiteten die beiden parallel laufenden DGPS-Ortungssysteme (FURUNO/NOVATEL und ASHTECH/ASHTECH) und die Datenaufzeichnung problemlos.

Im folgenden wird zunächst behandelt, inwieweit GPS für den täglichen Einsatz verfügbar war, anschließend sollen die erzielten Ortungsgenauigkeiten dargestellt werden.

4.3.1 Verfügbarkeit und Kontinuität des GPS zur Positions- und Zeitermittlung

Zu Beginn der Untersuchungen waren 23 GPS-Satelliten in Betrieb [78]. Damit waren die zur vollständigen und ununterbrochenen Abdeckung erforderlichen 21 Satelliten auf ihren Umlaufbahnen.

4.3.1.1 Verfügbarkeit an den Aufzeichnungstagen

Die Analysen ergaben, daß die Nutzung des GPS immer möglich war. Abgesehen von einem Tag konnte die Ortung beim Eingrasen stets mit DGPS erfolgen. Die Ursache für den ein-tägigen Ausfall lag beim Landwirt, der vergaß, nach Umräumungsarbeiten in der Maschinenhalle die Feststation wieder in Betrieb zu nehmen.

Auch bei allen Einsätzen mit der Rundballenpresse konnte die Ortung mit GPS im differentiellen Modus durchgeführt werden.

4.3.1.2 Zeitspanne zwischen Einschalten des Empfängers und erster Positionsausgabe

Beim FURUNO-Empfänger wurde untersucht, wieviel Zeit der Empfänger vom Einschalten bis zur Ausgabe der ersten aktuellen Positionskordinaten benötigte. Von den 130 zur Verfügung stehenden Tagen mit Aufzeichnungen wurden 79 für die Analyse ausgewählt, da nur an diesen Tagen der Schlepperfahrer am Standplatz unter dem Vordach das System einschaltete, unmittelbar danach losfuhr und den selben Weg zu den Schlägen nahm. Durch das unverzügliche Losfahren lief die Berechnung der ersten Positionskordinaten von Anfang an während des Fahrens ab. Die ermittelten Zeitspannen zwischen Einschalten und erster Positionsausgabe waren unterschiedlich groß (Abb. 17).

Die Spannen reichen von 7 bis 86 s, der Mittelwert beträgt etwa 51 s (Standardabweichung $s = 14,8$ s). Er liegt damit deutlich über dem vom Hersteller angegebenen Maximalwert von 45 s.

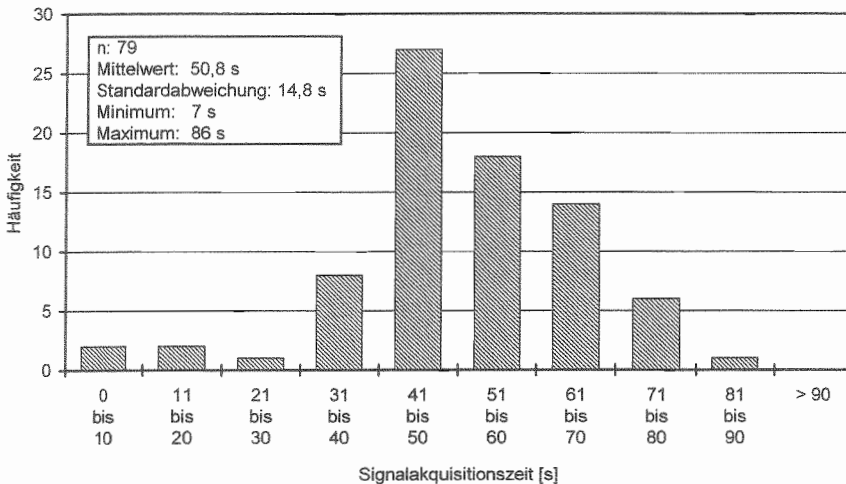


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilung der Zeitspannen zwischen Einschalten des GPS-Empfängers und Ausgabe der ersten Position (Empfänger: FURUNO GN-72).

4.3.1.3 Anzahl erfaßter Satelliten

Einfluß der Gebäude: Im Hofbereich standen aufgrund der Horizontüberhöhung durch die Gebäude im allgemeinen weniger Satelliten zur Verfügung als auf freiem Feld. Am regulären Abstellplatz des Schleppers war durch das mit Stahlblech bedeckte Vordach der Scheune der Empfang stark eingeschränkt: Während auf der Wiese hinter der Scheune sechs und mehr Satelliten erfaßt werden konnten, zeigte der Empfänger am Abstellplatz nur null bis drei verfügbare Satelliten an.

Einfluß der Vegetation: Für jeden Tag des Eingrasens (130 Hin- und 130 Rückfahrten) wurde die durchschnittliche Anzahl der Satelliten errechnet, deren Signale vom GPS-Empfänger des Schleppers empfangen wurden. Dabei wurde differenziert zwischen der Fahrt von der Hofstelle zum Schlag und der Rückfahrt, sowie zwischen der Teilstrecke ohne Straßenrandbepflanzung und der Alleeteilstrecke.

Den typischen Verlauf der Anzahl an erfaßten Satelliten auf der Fahrt vom Hof zum Schlag und zurück zeigt beispielhaft Abbildung 18.

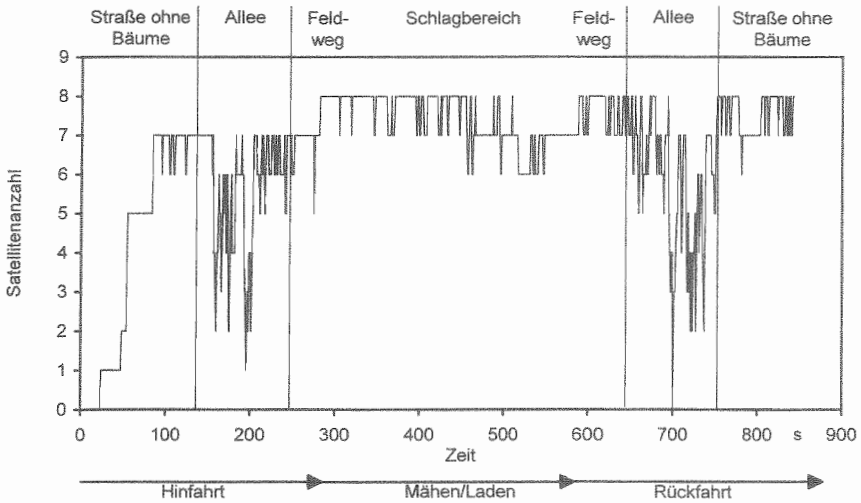


Abbildung 18: Anzahl der erfaßten Satelliten bei der Fahrt vom Hof zum "Flanninger Feld" und zurück am 31.5.1994 (Empfänger: FURUNO GN-72).

Bei der Abfahrt vom Hof (unmittelbar nach dem Einschalten des Empfängers) war die Satellitenanzahl noch null, stieg aber mit zunehmender Fahrtdauer an und bewegte sich vor der Allee im Bereich von sechs bis sieben. Sowohl bei der Fahrt zum Schlag als auch bei der Rückfahrt, verringerte sich im Alleebereich die Zahl der erfaßten Satelliten signifikant. Sie ging kurzzeitig sogar bis auf eins oder null zurück. Dabei wird auch der Teil der Allee mit Lücken im Baumbestand (von etwa $t = 200$ s bis $t = 245$ s und $t = 645$ s bis $t = 690$ s) sichtbar. Diese Unterschiede zwischen der Straße ohne Randbepflanzung und der Allee zeigen auch die Durchschnittszahlen aller Fahrten (Tab. 10).

Zur besseren Vergleichbarkeit sind bei den Fahrten zum Schlag die Daten der Akquisitionsphase ausgeklammert (erst nach Beginn der dreidimensionalen Ortung, d.h. mindestens vier Satelliten wurden registriert, gingen die Werte in die Berechnungen mit ein). Bei allen drei Gruppierungen der Fahrten wurden auf der Allee immer weniger Satelliten erfaßt als auf der baumfreien Strecke. Diese Unterschiede sind höchstsignifikant ($p \leq 0,001$). Inwieweit Veränderungen des Belaubungszustandes im Jahresablauf die Empfangssituation beeinflussen, konnte nicht untersucht werden, da andere Parameter, die später vorgestellt werden, mögliche Auswirkungen überlagerten.

Tabelle 10: Durchschnittliche Anzahl erfaßter Satelliten beim täglichen Eingrasen an 130 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (ohne Akquisitionsphase; Empfänger: FURUNO GN-72).

	Fahrt zum Schlag		Rückfahrt		Fahrt zum Schlag und Rückfahrt	
	Straße ohne Randbepflanzung	Allee	Straße ohne Randbepflanzung	Allee	Straße ohne Randbepflanzung	Allee
Mittelwert	5,62	4,85	6,24	5,12	5,93	4,99
Standardabw.	1,03	0,79	1,11	0,91	1,12	0,86
Minimum	3,00	2,97	3,00	3,30	3,00	2,97
Maximum	7,50	6,29	7,84	7,34	7,84	7,34

Einfluß der Empfängerlaufzeit: Wie in Abbildung 18 ersichtlich ist, hat der GPS-Empfänger unmittelbar nach dem Einschalten noch keine Satelliten registriert. Die Zahl erfaßter Satelliten steigt aber mit zunehmender Einschaltdauer an. Obwohl die Ergebnisse von Tabelle 10 die Akquisitionsphase nicht enthalten, zeigt sich dennoch auf der Strecke ohne Randbepflanzung ein hochsignifikanter Unterschied ($p \leq 0,001$) in der Anzahl registrierter Satelliten zwischen der Fahrt zum Schlag ($\bar{x} = 5,62$) und Rückfahrt ($\bar{x} = 6,24$). Auch für die Allee ist dieser Unterschied ($\bar{x} = 4,85$ zu $\bar{x} = 5,12$) gegeben. Er ist zwar nicht so markant wie auf dem baumfreien Abschnitt, aber noch mit $p \leq 0,02$ statistisch absicherbar.

Unbekannte Einflüsse: Deutliche Unterschiede in der Anzahl erfaßter Satelliten ergaben sich auch über sieben Monate hinweg (Abb. 19).

Während der zweiten Junihälfte und im Juli wurden sowohl auf der Straße ohne Randbepflanzung als auch im Alleebereich deutlich weniger Satelliten registriert als in den restlichen Monaten. Die eigenen Betriebsparametern blieben in diesem Zeitraum unverändert.

4.3.1.4 Kontinuität

Die Ortung im differentiellen Modus (DGPS) war nicht immer möglich. Sie konnte teilweise nur im Standardmodus erfolgen oder fiel ganz aus. Dabei zeigten sich bei den Fahrten zum Eingrasen wiederum deutliche Unterschiede zwischen dem Straßenabschnitt ohne Randbepflanzung und der Allee (Tab. 11).

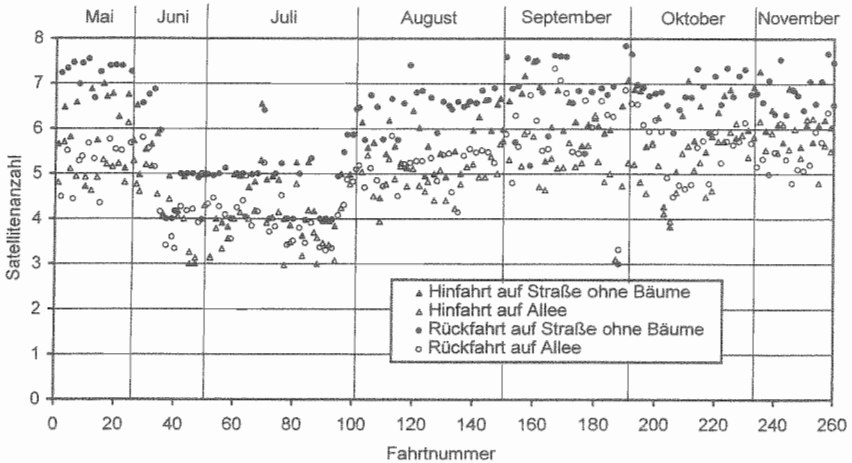


Abbildung 19: Durchschnittliche Anzahl erfaßter Satelliten auf der Strecke Neuhausen-Flanning an 130 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (aufgeteilt in 130 Hin- und 130 Rückfahrten; Empfänger: FURUNO GN-72).

Tabelle 11: Zeitanteile der Ortungsausfälle, Ortung mit GPS und DGPS beim täglichen Eingrasen an 129 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994* (ohne Akquisitionsphase; Empfänger: FURUNO GN-72).

	Straße ohne Randbepflanzung			Allee		
	Ortungsausfälle %	GPS %	DGPS %	Ortungsausfälle %	GPS %	DGPS %
Mittelwert	0,00	0,24	99,76	4,32	2,94	92,74
Standardabw.	0,00	1,24	1,24	3,88	6,49	8,15
Minimum	0,00	0,00	90,91	0,00	0,00	55,56
Maximum	0,00	9,09	100,00	20,29	32,81	100,00

*Daten des Tages ohne Feststationsbetrieb nicht berücksichtigt

Während bei den Fahrten auf der Strecke ohne Straßenrandbäume keine Ortungsausfälle zu verzeichnen waren, betrug der durchschnittliche Anteil der Zeit ohne Ortung auf der Allee 4,32 %; die Streuung erstreckte sich von 0 bis etwa 20 %. Die Ausfälle bei einer Fahrt kamen selten in einem Stück, sondern in Teilen von 1 bis 8 s Dauer, wobei sich die meisten auf 1 oder 2 s beliefen. Sie traten am häufigsten in den Monaten mit einer geringeren Zahl an erfaßten Satelliten auf (Juni und Juli). Trotz der Ausfälle wurde vom Empfänger eine

Position ausgegeben. Hierbei handelte es sich aber um Extrapolationswerte auf Basis der letztermittelten Koordinaten.

Auf dem Abschnitt ohne Randbäume erfolgte die Ortung fast ausschließlich (99,76 %) im differentiellen Modus. Nur an zehn der 129 untersuchten Tage wurde die Marke von 100 % nicht erreicht. Eine Anhäufung der Tage mit weniger als 100 % Anteil in den Monaten Juni und Juli war nicht festzustellen. Ebenso ließen sich keine Unterschiede zwischen der Fahrt zum Schlag und der Rückfahrt zur Hofstelle nachweisen.

Für die Fahrten auf der Allee lag der durchschnittliche zeitliche Anteil der differentiellen Ortung bei knapp 93 %, wobei die Werte in einem Bereich von ca. 56 bis 100 % streuten (siehe Tab. 11). Zwischen Hin- und Rückfahrten waren keine signifikanten Abweichungen zu verzeichnen. Ein Anteil von 100 % wurde bei ungefähr einem Viertel der Fahrten erreicht; die niedrigeren Anteilswerte für DGPS traten verstärkt in den Monaten Juni und Juli auf (Abb. 20).

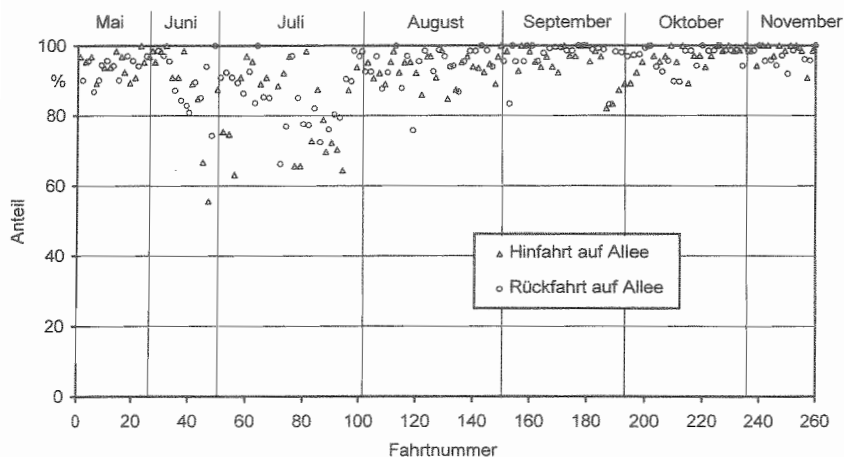


Abbildung 20: Zeitanteil der differentiellen Positionsermittlung (DGPS) auf der Alleestrecke Neuhausen-Flanning an 129 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (aufgeteilt in 129 Hin- und 129 Rückfahrten; Empfänger: FURUNO GN-72).

4.3.1.5 Zeitermittlung

Bei allen Untersuchungen gaben die GPS-Empfänger stets die korrekte Zeit aus. Die erwähnten kurzfristigen Ortungsausfälle hatten keinerlei Einfluß auf die Zeitangaben. Selbst längere Phasen ohne Signalempfang, wie z.B. unter dem Scheunenvordach, verursachten keine Störungen.

Auch unmittelbar nach dem Einschalten zeigte der Empfänger die Uhrzeit an. Hierbei handelte es sich um die empfängerinterne Zeit, die sich nicht merkbar von der GPS-Systemzeit bzw. UTC unterschied. Etwaige Abweichungen werden durch eine Synchronisation mit den Uhren der Satelliten, sobald Signale von ihnen empfangen werden, korrigiert.

4.3.2 Genauigkeit der Positionsermittlung mit GPS

4.3.2.1 Position Dilution of Precision (PDOP)

Beim PDOP, der ein Parameter für die erzielbare Genauigkeit bei der GPS-Ortung ist, waren vergleichbar mit der Anzahl der erfaßten Satelliten auf der Alleestrecke ebenfalls die ungünstigeren Werte zu verzeichnen (Tab. 12).

Tabelle 12: Durchschnittlicher PDOP beim täglichen Eingrasen an 130 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (ohne Akquisitionsphase; Empfänger: FURUNO GN-72).

	Fahrt zum Schlag		Rückfahrt		Fahrt zum Schlag und Rückfahrt	
	Straße ohne Randbepflanzung	Allee	Straße ohne Randbepflanzung	Allee	Straße ohne Randbepflanzung	Allee
Mittelwert	3,29	3,95	2,72	3,86	3,00	3,91
Standardabweichung	2,32	1,60	1,44	1,49	1,95	1,54
Minimum	1,60	2,13	1,51	1,90	1,51	1,90
Maximum	21,38	14,16	12,60	10,94	21,38	14,16

Im Alleebereich für Hin- und Rückfahrt zusammen lag der PDOP mit 3,91 um circa 0,9 höher als auf der Straße ohne Randbepflanzung. Dieser Unterschied ist mit $p \leq 0,001$

höchstsignifikant. Eine statistisch absicherbare Differenz ($p \leq 0,02$) war auch zwischen der Fahrt zum Schlag und der Rückfahrt auf der baumfreien Strecke zu verzeichnen. Zwischen der Hinfahrt und der Rückfahrt auf der Allee konnte für den PDOP kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Ähnlich wie bei der Anzahl an registrierten Satelliten traten in der zweiten Junihälfte und im Juli verstärkt ungünstigere PDOP-Werte auf (Abb. 21).

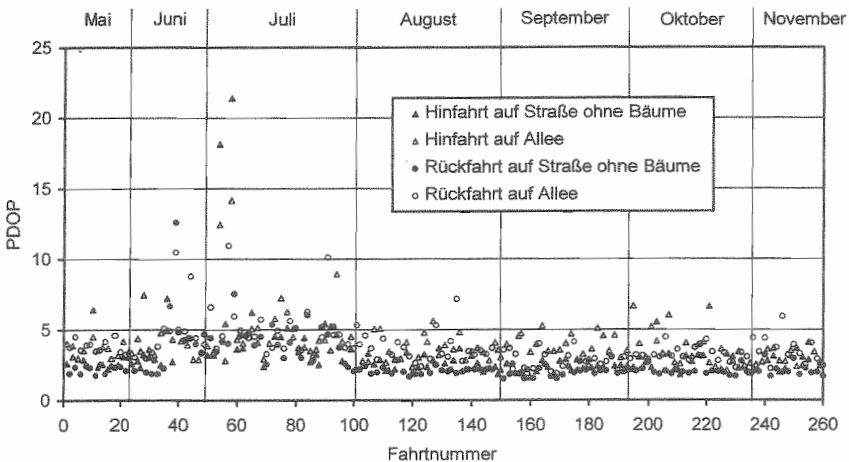


Abbildung 21: Durchschnittlicher PDOP auf der Strecke Neuhausen-Flanning an 130 Tagen im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 (aufgeteilt in 130 Hin- und 130 Rückfahrten; Empfänger: FURUNO GN-72).

In diesem etwa sechswöchigen Zeitraum lagen die Angaben für den PDOP im Durchschnitt um mehr als eins höher als in den Abschnitten davor und danach. Es waren auch gehäuft stark erhöhte Werte zu verzeichnen.

Die Verschlechterung des PDOP führte zu ungenaueren Positionsangaben. Dies zeigen die folgenden Darstellungen der ermittelten Fahrwege sehr deutlich.

4.3.2.2 Streuung der Fahrspuren im Zeitraum von sechs Monaten

Da die GPS-Ortung während des täglichen Eingrasens über sechs Monate erfolgte, konnte die Streuung bzw. die Genauigkeit der Positionsermittlung über einen längeren Zeitraum untersucht werden. Für diese Analyse wurden die Fahrspuren in einer Graphik übereinandergelegt und mit Hilfe von *AutoCad* vermessen. In den folgenden Darstellungen sind die Fahrspuren nach Fahrten zum Schlag und Rückfahrten getrennt, da aufgrund der jeweils zu nutzenden Fahrbahnseite Hinweg und Rückweg nicht identisch sind. Für diese getrennte Darstellung spricht auch die unterschiedliche Anzahl an registrierten Satelliten und abweichenden PDOP-Werte zwischen Hin- und Rückfahrt.

Je genauer die Ortung, desto schmaler wird das Band mit den Fahrspuren, das durch die Übereinanderlagerung entsteht. Die Mittellinie des Streuungsbandes dürfte dabei dem tatsächlichen Weg am nächsten kommen. Bei den Fahrten von der Hofstelle zum Schlag ergab sich ein relativ großer Streuungsbereich (Abb. 22).

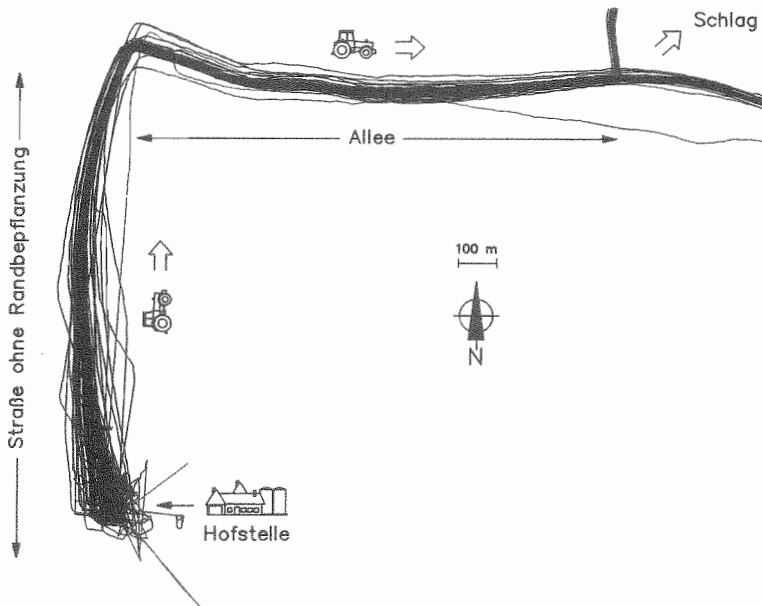


Abbildung 22: Fahrspuren des Schleppers von der Hofstelle zum Schlag im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 auf der Strecke Neuhausen-Flanning (130 Fahrten erfaßt mit FURUNO GN-72).

Die geringste Ortungsgenauigkeit ist im Hofbereich und in der näheren Umgebung des Hofes festzustellen. Das Fahrspurband nimmt eine Breite von deutlich über 100 m ein, die Ortungsfehler übersteigen damit z.T. einen Wert von 50 m. Mit zunehmender Fahrdauer bzw. Einschaltdauer des GPS-Empfängers erhöht sich die Ortungsgenauigkeit: Im westlichen Bereich der Allee liegt der Großteil der Fahrten bereits in einem Bereich mit einer Breite von 30 m, im östlichen Teil hat sich die Streuung noch weiter verringert.

Da sich die Anzahl an erfaßten Satelliten und der PDOP in der Ortungsgenauigkeit niederschlagen und diese beiden Parameter in den Monaten Juni und Juli des Untersuchungszeitraums ungünstiger ausfielen als in den Zeiträumen davor und danach, wurden die Hinfahrten in zwei Blöcke mit je 65 Fahrten bzw. Tagen aufgeteilt: Der erste mit den Fahrten vom 15.5.1994 bis zum 22.8.1994 (enthält somit die Monate Juni und Juli), der zweite mit den Fahrspuren vom 23.8.1994 bis 13.11.1994. Für diesen zweiten Zeitraum ergab sich ein deutlich schmäleres Fahrspurband, die Ortung war somit wesentlich genauer (Abb. 23).

Die Ortungsfehler im Hofbereich sind zwar noch beträchtlich, sie gehen aber mit zunehmender Fahrdauer sehr viel stärker zurück, als die Fehler, die in Abbildung 22 zu erkennen sind: Am Ende der Allee beträgt die Breite des Fahrspurbandes noch etwa 15 m, wobei 64 der 65 Fahrten in einem Bereich mit etwa 9 m Breite liegen. Die Ursachen der Ortungsfehler bei der Fahrspur mit den größten Abweichungen (A1) konnten nicht gefunden werden. Hinsichtlich der Anzahl an registrierten Satelliten und des PDOP unterscheidet sie sich nicht wesentlich von anderen Fahrten.

In Abbildung 23 sind auch Fahrspuren zu erkennen, die bereits relativ eng gebündelt aus der Hofstelle herausführen. Bei diesen Fahrten startete der Schlepper nicht vom Abstellplatz unter dem Vordach aus, sondern von einem anderen Ort im Hofbereich, wobei der GPS-Empfänger schon vor Abfahrt die erste Neuposition berechnet hatte. Wie lange das Empfangsgerät bereits vor der Abfahrt lief, konnte nicht festgestellt werden.

Den Zusammenhang zwischen Steigerung der Ortungsgenauigkeit und zunehmender Empfängerlaufzeit- bzw. Anzahl erfaßter Satelliten unterstreichen auch die Analysen der Rückfahrten (bei der Feldarbeit lief der Empfänger weiter!). Die Spuren der Fahrten vom Schlag zur Hofstelle fügen sich mit Ausnahme von Fahrspuren mit überdurchschnittlichen Ortungsfehlern in ein relativ schmales Band ein (Abb. 24).

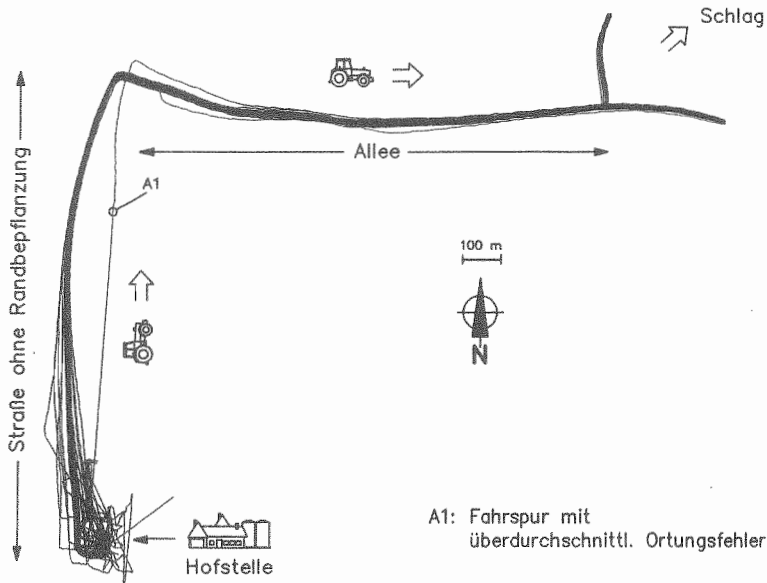


Abbildung 23: Fahrspuren des Schleppers von der Hofstelle zum Schlag im Zeitraum vom 23.8.1994 - 13.11.1994 auf der Strecke Neuhausen-Flanning (65 Fahrten erfaßt mit FURUNO GN-72).

Abgesehen von der Fahrspur A1, die bei ausgeschalteter Feststation ermittelt wurde, erstreckt sich auf der Straße ohne Randbepflanzung die Streubreite der Spuren von 50 m (nach dem Abbiegen von der Allee) bis zu 25 m kurz vor der Ankunft auf dem Hof. Im Alleebereich und auf den östlich folgenden Abschnitten sind auch Spuren mit überdurchschnittlichen Abweichungen zu erkennen; die Streuung ist insgesamt etwas höher. Im Hofbereich sind drei unterschiedliche Abfahrten von der Straße in den Hof zu lokalisieren.

Die geringste Streuung zeigen die 65 Fahrspuren vom 23.8.1994 - 13.11.1994, d.h. die beiden Monate mit der verringerten Anzahl an registrierten Satelliten sind nicht enthalten (Abb. 25).

Die noch etwas größere Streuung unmittelbar nach dem Abbiegen von der Allee verringert sich auf dem Abschnitt ohne Straßenrandbäume mit zunehmender Hofnähe bis auf etwa 5 m. Auf dem Alleeteilstück ist die Streuung etwa größer, die Breite des Fahrspurbands erstreckt sich von ca. 5 bis auf etwa 20 m. Fahrspuren mit deutlich überdurchschnittlichen Ortungsfehlern sind nicht mehr festzustellen.

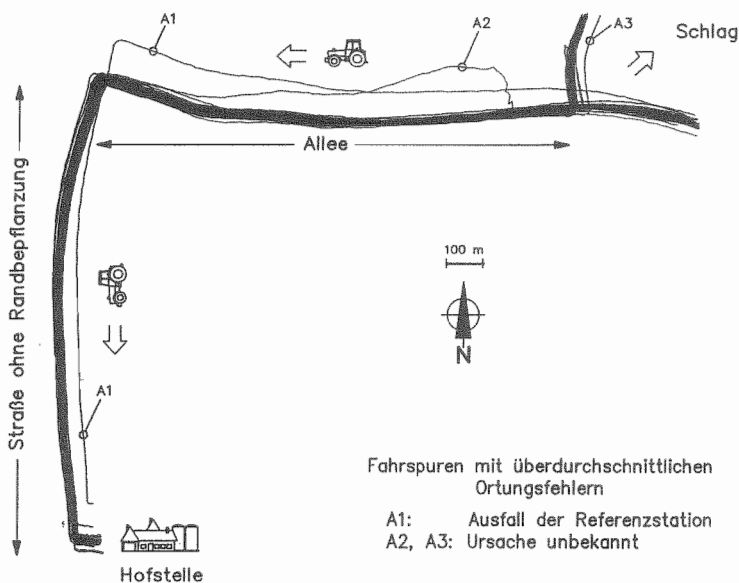


Abbildung 24: Fahrspuren des Schleppers vom Schlag zur Hofstelle im Zeitraum vom 15.5.1994 - 13.11.1994 auf der Strecke Flanning-Neuhausen (130 Fahrten erfaßt mit FURUNO GN-72).

4.3.2.3 Ursachen der Fahrspurstreuung

Die bisherigen Ergebnisse zeigen sehr deutlich den Zusammenhang zwischen der Ortungsgenauigkeit bzw. der Streuung der Fahrspuren und der Anzahl der Satelliten, deren Signale empfangen werden konnten: Die Ortungsfehler waren durchschnittlich niedriger

- auf dem Streckenabschnitt ohne Straßenrandbepflanzung,
- in der zweiten Hälfte des Untersuchungszeitraums,
- nach längerer Einschaltdauer des GPS-Empfängers.

Fahrspuren mit den größeren Abweichungen vom Durchschnitt kennzeichnete überwiegend eine geringere Anzahl an registrierten Satelliten und/oder höhere PDOP-Werte auf. Es waren aber auch Fahrten zu verzeichnen, bei denen trotz ungünstiger Parameterwerte die Spuren relativ mittig im Streuungsband lagen.

Der eintägige Ausfall der Referenzstation zeigte sehr deutliche Auswirkungen auf die Ortungsgenauigkeit. Wie in Abbildung 24 zu sehen ist, liegt an diesem Tag der ermittelte

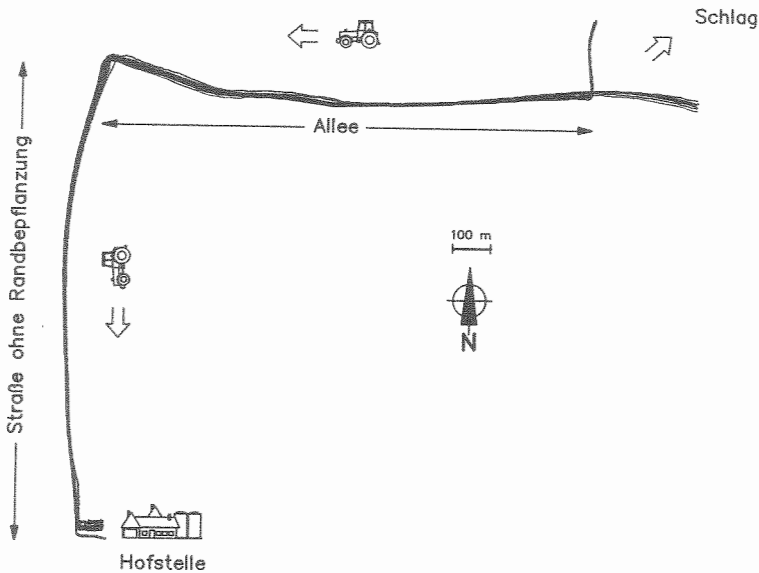


Abbildung 25: Fahrspuren des Schleppers vom Schlag zur Hofstelle im Zeitraum vom 23.8.1994 - 13.11.1994 auf der Strecke Flanning-Neuhausen (65 Fahrten ermittelt mit FURUNO GN-72).

Weg (A1) für die Rückfahrt auf dem Abschnitt ohne Baumbewuchs bis zu 40 m neben dem Spurenband und bis zu annähernd 100 m abseits der Alleemittellinie. Die Fahrt zum Feld hebt sich dagegen von den anderen Hinfahrten nicht ab.

Der Einfluß empfängerinterner Glättungsalgorithmen wurde beim Abbiegen des Schleppers deutlich sichtbar (Abb. 26).

Dargestellt ist beispielhaft die ermittelte Fahrspur von der Hofstelle zum Schlag und zurück an einem Tag. Bei dieser Fahrt waren die Zahlen der registrierten Satelliten relativ groß und die PDOP-Werte sehr niedrig. Die Fahrspur liegt überwiegend mittig im Streuband aus den Abbildungen 22 und 24. Während bei einem Großteil der Strecke die Spuren der Hin- und der Rückfahrt eng zusammenliegen, verlaufen sie insbesondere beim und nach dem Abbiegen auseinander. Der ermittelte Fahrweg ist nach dem Abzweigen zu weit in Richtung der Fahrzeugbewegung vor dem Abbiegen verlagert: Wird nach rechts abgebogen, so erscheint die folgende Fahrspur zu weit links, wird zur anderen Seite abgebogen, so liegt sie zu weit rechts. Erst nach einiger Zeit verringert sich der Einfluß der ursprünglichen Fahrtrichtung und die Spuren der Hin- und der Rückfahrt liegen wieder dicht zusammen.

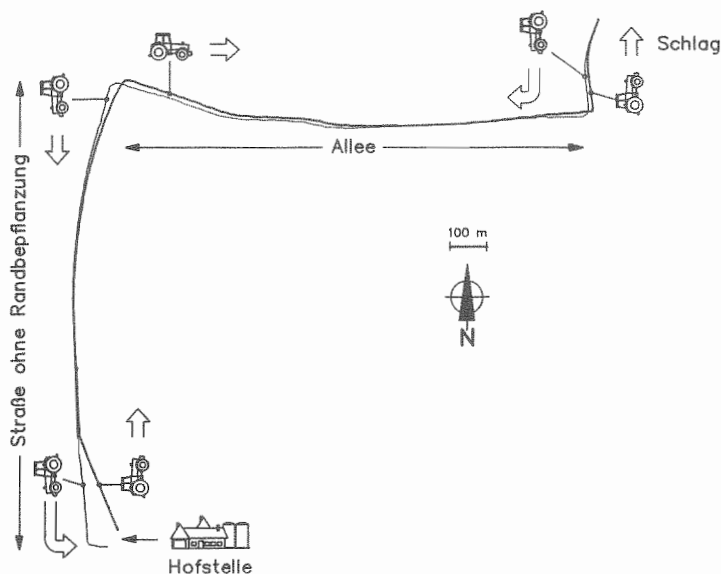


Abbildung 26: Fahrspur des Schleppers von der Hofstelle zum Schlag und zurück auf der Strecke Flanning-Neuhausen am 17.5.1994 (Empfänger: FURUNO GN-72).

Dieser fehlerhafte Versatz der Fahrspuren zeigt sich auch auf der östlichen Kreuzung (siehe Abb. 25): Bei den Fahrten, bei denen der Schlepper aus Richtung Norden kam, liegen die festgestellten Fahrspuren nach dem Abzweigen zu weit südlich. Die empfängerinternen Glättungsalgorithmen berücksichtigen zu stark die vorausgehende Fahrzeugbewegung und führen so zu verfälschten Positionsangaben.

4.3.2.4 Empfängereinfluß auf die Ortungsgenauigkeit

Beim Vergleich der beiden eingesetzten GPS-Anlagen ergaben sich gravierende Unterschiede im Verlauf der ermittelten Fahrspuren. Abbildung 27 zeigt den Weg, der mit dem Empfänger von FURUNO bei einem Einsatz der Rundballenpresse festgestellt wurde.

Zur genaueren Bestimmung der Ortungsfehler erfolgte vor dem Pressen eine Ermittlung des Schwadverlaufs mit einem Stahlbandmaß. Die gemessenen Schwadlinien wurden graphisch mit *AutoCad* über den vom GPS-Empfänger ermittelten Fahrweg gelegt. Da die GPS-Antenne

des Schlepper nicht auf der Fahrzeuglängsachse, sondern in Fahrrichtung gesehen 63 cm links von ihr angebracht war, mußten zur besseren Vergleichbarkeit in der Darstellung die handvermessenen Schwadverläufe um 63 cm verschoben werden.

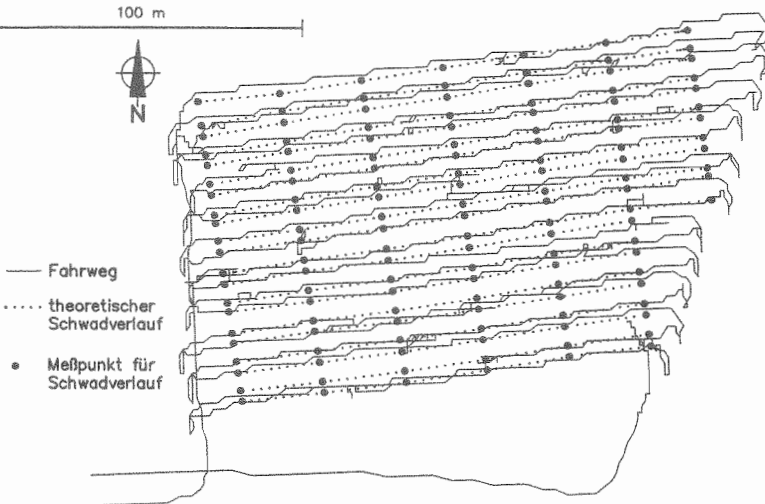


Abbildung 27: Fahrspur des Schleppers beim Rundballenpressen auf der Grafwiese und Schwadverlauf am 29.6.1995 (Empfänger: FURUNO GN-72).

Die Fahrwegdarstellung, die auf den Werten des FURUNO-Empfängers beruht, weist deutlich zwei Charakteristika auf: Zum einen zeigt sich bei den Spuren ein starker Diskontinuität ("Treppeneffekt"), zum anderen ist bei Positionsanhäufungen (kurzes Rückstoßen zum Ballenauswerfen und Fahrzeugstillstand für andere Messungen) ein stärkeres, fehlerhaftes Streuen einzelner Positionspunkte zu erkennen. Diese Fehler belaufen sich auf bis zu 4 m.

Beim Vergleich der Fahrspur mit dem Schwadverlauf während des Pressens zeigen sich öfters Unterschiede von ebenfalls bis zu 4 m. Der größte Ortungsfehler ist im südöstlichen Schlagbereich, am Startpunkt der Rückfahrt zu sehen. Bei Fahrzeugstillstand (Vorbereitung der Presse zur Fahrt) driftet die ermittelte Position um fast 10 m nach Norden. Dieser Versatz setzt sich auf dem Rückweg fort: Auf der einspurigen Teilstrecke müßten die Spuren der Hin- und Rückfahrt annähernd deckungsgleich sein.

Deutlich geringer sind die Ortungsfehler bei der Fahrspur, die auf den Positionswerten des ASHTECH-Empfängers beruhen (Abb. 28).

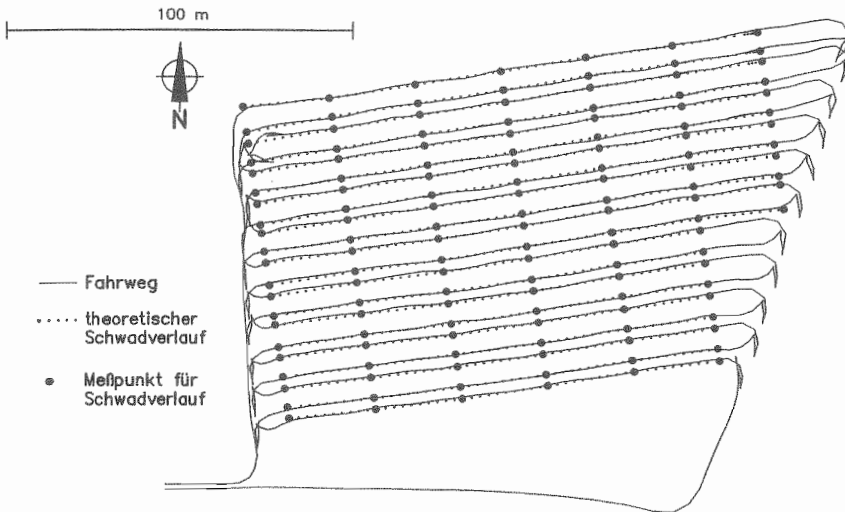


Abbildung 28: Fahrspur des Schleppers beim Rundballenpressen auf der Grafwiese und Schwadverlauf am 29.6.1995 (Empfänger: ASHTECH M XII).

Die Fahrspur und die ausgemessenen Schwadverläufe zeigen überwiegend eine sehr gute Deckung. Eine Streuung der Positionswerte bei Fahrzeugstillstand ist nicht zu erkennen. Die Abweichungen betragen maximal etwa 70 cm.

Nach den Almanachdaten standen während dieses Einsatzes zwischen sieben und neun Satelliten zur Verfügung, wobei aber Abschattungseffekte aufgrund der leicht hügeligen Umgebung und eines Obstgartens an der westlichen Schlaggrenze in Betracht zu ziehen sind. Die Anzahlen an Satelliten, die durch das FURUNO- und das ASHTECH-System im Durchschnitt erfaßt wurden, unterscheiden sich nicht signifikant ($\bar{x} = 6,5$ und $\bar{x} = 6,6$). Anders beim durchschnittlichen PDOP: Hier liegt der Wert vom ASHTECH M XII mit $\bar{x} = 1,8$ deutlich unter dem Wert von $\bar{x} = 2,8$ des FURUNO-Gerätes.

Ein detaillierteres Bild über die Anzahl der Satelliten und der PDOP-Werte beim Einsatz der Rundballenpresse am 29.6.1995 zeigt Tabelle 13.

Beim Empfänger von ASHTECH streuen die Häufigkeiten für die Anzahl an erfaßten Satelliten wesentlich geringer als beim FURUNO-Gerät. So registrierte er z.B. sieben Satelliten bei 70 % der Aufzeichnungszeit. Bei den absoluten Häufigkeitszahlen ist zu berücksichtigen,

Tabelle 13: Anzahl erfaßter Satelliten und PDOP-Werte beim Einsatz der Rundballenpresse am 29.6.1995 auf der Grafwiese einschließlich Hin- und Rückfahrt.

E M P f ä. Ä.	Erfaßte Satelliten			PDOP-Werte				
	Anzahl	Häufig- keit	Relativer Anteil %	Spannweite	Relative Anteile mit PDOP-Werten von			
					1,0 %	1,1-3,0 %	3,1-8,0 %	>8,0 %
F U R U N O	< 4	39	0,1	0* - 15,6	-	-	-	-
	4	120	2,2	1,4 - 39,7	0,0	5,0	25,8	69,2
	5	407	7,4	2,3 - 9,6	0,0	3,4	94,1	2,5
	6	1777	32,1	1,9 - 7,6	0,0	95,2	4,8	0,0
	7	2845	51,5	1,8 - 2,5	0,0	100,0	0,0	0,0
	8	340	6,2	1,7 - 1,8	0,0	100,0	0,0	0,0
> 8	0	0,0	-	-	-	-	-	
A S H T E C H	< 4	46	1,6	0*	-	-	-	-
	4	28	1,0	2,0 - 7,1	0,0	3,6	96,4	0,0
	5	29	1,0	2,3 - 4,4	0,0	65,5	34,5	0,0
	6	744	26,6	1,5 - 2,7	0,0	100,0	0,0	0,0
	7	1947	69,7	1,3 - 2,0	0,0	100,0	0,0	0,0
	> 7	0	0,0	-	-	-	-	-

* 0 bedeutet, daß kein PDOP errechnet werden konnte

daß beim ASHTECH M XII die Aufzeichnungsrate zwei Sekunden betrug und deshalb in der Gesamtsumme nur etwa halb so viele Häufigkeitswerte vorliegen wie beim FURUNO GN-72.

Bei den PDOP-Werten zeigen sich für den FURUNO-Empfänger wesentlich größere Spannweiten mit entsprechend hohen Maximalwerten. Bei einer Anzahl von vier Satelliten ist zusätzlich ein sehr hoher Anteil an unbefriedigenden Werten (> 8,0) festzustellen. PDOP-Werte dieser Kategorie kommen beim ASHTECH-Gerät nicht vor. Für überwiegend gute Werte (1,1 - 3,0) müssen bei ASHTECH M XII mindestens fünf, beim FURUNO GN-72 mindestens sechs Satelliten erfaßt werden. Ein Anteil von über 90 % an guten PDOP-Werten wird bei beiden Empfängern ab sechs Satelliten möglich.

4.3.2.5 Einfluß der Post Processing-Software auf die Ortungsgenauigkeit

Einen erheblichen Einfluß auf die Ortungsgenauigkeit hat die eingesetzte Software. Auswirkungen der Empfängerbetriebssoftware konnten nicht untersucht werden, da keine neueren Versionen zur Verfügung standen, aber für das Post Processing der ASHTECH-Daten war eine Positionsdatenkorrektur mit einer verbesserten Version möglich. Die neue Software zeichnete sich durch eine Einbeziehung der Trägerphaseninformation in die Korrekturberechnungen aus. Die bisher aufgeführten Ergebnisse basieren auf ihr. Für die Einflußermittlung der Korrektursoftware wurde ein Rohdatensatz sowohl mit der alten als auch mit der neuen Software verrechnet (Abb. 29).

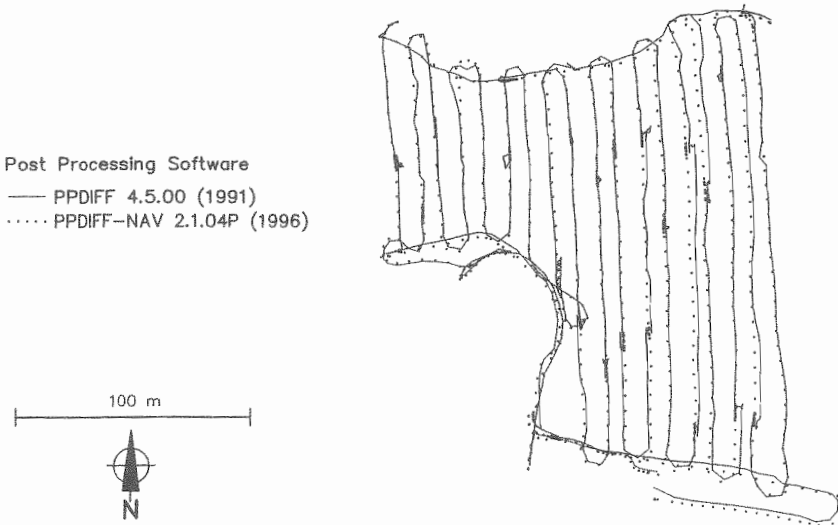


Abbildung 29: Fahrspur des Schleppers beim Rundballenpressen am 21.9.1993 auf der Angerwiese (Empfänger: ASHTECH M XII, Post Processing-Software: PPDIFF 4.5.00 und PPDIFF-NAV 2.1.04P).

Die aktuellere Software führt zu einer erheblichen Verringerung der Ortungsfehler. Dies zeigt sich insbesondere an den Orten, an denen das Fahrzeug stillstand: Im ursprünglichen Fahrweg sind fehlerhafte seitliche Positionssprünge von bis zu 4 m zu verzeichnen, im neu berechneten Fahrweg tauchen sie nicht mehr auf. Auch weisen im neuen Fahrweg die Spuren einen geradlinigeren Verlauf auf, der den tatsächlichen Gegebenheiten bedeutend näher kommt.

4.4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, daß GPS gut zur Zeit- und Positionsermittlung im alltäglichen landwirtschaftlichen Einsatz geeignet ist. Dabei bedürfen aber einige Ergebnisse einer intensiveren Diskussion.

4.4.1 GPS zur Zeitermittlung

In allen Versuchen und bei sämtlichen Einsatzbedingungen war die Zeitermittlung mit GPS möglich. Sogar unter Bäumen oder in Gebäuden, wenn keine Satellitensignale empfangen werden konnten, wurde vom Empfänger immer die Zeit ausgegeben. Selbst kurzfristige Ausfälle waren nicht zu verzeichnen. Auch wurde unmittelbar nach dem Einschalten die Zeit angezeigt. Verfügbarkeit, hohe Genauigkeit und Kontinuität waren stets gegeben. Diese Leistungen des GPS-Empfängers zur Zeitermittlung werden auch ohne eine Referenzstation erzielt.

Wie bereits erwähnt, entspricht die vom GPS-Empfänger ausgegebene Zeit UTC nicht der in Deutschland verwendeten Mitteleuropäischen Zeit. Die MEZ läuft gegenüber der UTC eine Stunde voraus, während der Sommerzeit zwei. Diese Abweichung muß bei der Einordnung der Zeitmessungen in den Tagesablauf bei automatisierten Dokumentationen berücksichtigt werden. Denkbar wäre hier eine automatisierte Anpassung an die Orts- und Sommerzeit durch den PC, der die Daten des GPS-Empfängers aufzeichnet. Die Anpassung an die Ortszeit könnte auch durch den GPS-Empfänger oder den Erfassungsrechner erfolgen. Aufgrund der ermittelten Position könnte eines der beiden Geräte die jeweilige Zeitzone feststellen und die dafür gültige Ortszeit ermitteln.

Die ausgegebene Uhrzeit ist zwar hochexakt, aber die Genauigkeit der Messung eines Zeitabschnittes ist durch die Datenausgabeintervalle des Empfängers begrenzt. Beim FURUNO- und beim ASHTECH-Empfänger beträgt das kürzeste Intervall 1 s. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde beim ASHTECH-Gerät die Intervalllänge auf 2 s erhöht, wodurch sich die mögliche Aufzeichnungsdauer von drei auf sechs Stunden verdoppelte, bevor eine ablaufunterbrechende Speicherentleerung notwendig war. Als Lösungsmöglichkeit für exakte

Zeitmessungen ohne Unterbrechungen bietet sich eine entsprechende Speichererweiterung oder eine direkte Weitergabe der Daten an einen nachgeschalteten PC an.

4.4.2 GPS-Verfügbarkeit und Kontinuität bei der Positionsermittlung

An allen Untersuchungstagen konnte die Ortung mit GPS durchgeführt werden. Es traten keinerlei Ausfälle über längere Zeiträume auf. Im Gegensatz zur Zeitermittlung waren aber Einschränkungen und kurzzeitige Ausfälle in der Positionsbestimmung zu verzeichnen.

Ausfälle von kurzer Dauer gingen vor allem auf die Abschattung der Signale unter Bäumen oder in Gebäuden zurück. Ein Signalverlust in Gebäuden hätte aber keine gravierenden Auswirkungen für eine automatisierte Datenerfassung. Für Zeitmessungen stände eine Zeitangabe weiterhin zur Verfügung, und das Gebäude als Aufenthaltsort könnte anhand der letzten ermittelten Position vor dem Einfahren und der ersten Position nach dem Verlassen identifiziert werden. Voraussetzung dafür ist, daß in der näheren Umgebung des Gebäudes eine Ortung möglich ist und das Gebäude geodätisch erfaßt wurde.

Da ausführliche systematische Untersuchungen zur Ermittlung der Signalabschattung durch Vegetation außerhalb des gesteckten Rahmens lagen, wurden die eigenen Untersuchungen auf ein typisches Beispiel, eine Baumallee, beschränkt. Die Ergebnisse zeigen sehr deutlich den Einfluß, der von Bäumen ausgeht. Während auf der Straße ohne Randbepflanzung die Positionsermittlung mit GPS immer möglich war, betrug im Durchschnitt aller Fahrten auf der Allee der Ortungsausfall mehr als 4 %. Bei Schlägen, die an Wäldern oder hohen Hecken liegen, ist deshalb mit ähnlichen Ausfällen zu rechnen. Dies zeigen andeutungsweise Ergebnisse von anderen Untersuchungen [166]. Die in Tabelle 3 aufgestellte Forderung von einem Anteil unter einem Prozent für Ortungsausfälle, wird somit nicht erfüllt. In den Fahrspuren auf der Allee, die auf den Daten des FURUNO-Empfängers basieren, sind die Ausfälle aber nicht zu erkennen, denn die Empfängeralgorithmen überdecken die Lücken durch Extrapolation. Diese Methode hat nur Erfolg bei Fahrten, bei denen keine plötzlichen größeren Richtungs- und Geschwindigkeitsänderungen vorkommen. Die Nachteile der Berechnungsalgorithmen zeigen sich bei Kurvenfahrten, hauptsächlich bei höheren Geschwindigkeiten, wie in den Abbildungen 25 und 26 zu sehen ist: Der ermittelte Fahrweg wird nach der Kurve fälschlicherweise zu weit in Richtung der Bewegung vor dem Abbiegen gelegt.

Bemerkenswert ist auch, daß bei den vom FURUNO-Empfänger erfaßten Fahrten ein signifikanter Unterschied zwischen den Fahrten zum Schlag und zurück besteht. Dieser Unterschied zwischen Hin- und Rückfahrt liegt auch vor, wenn nur der Alleeabschnitt betrachtet wird. Da im Mittel der Schlepper vom Hof bis zur Mitte der Allee ca. drei Minuten benötigte, kann gefolgert werden, daß der verwendete GPS-Empfänger nach drei Minuten noch nicht alle zur Verfügung stehenden Satelliten registriert hatte und seine Akquisitionsphase noch nicht abgeschlossen war. Die niedrigere Anzahl an erfaßten Satelliten bei der Hinfahrt, mit deutlichen Auswirkungen auf die Genauigkeit, liegt nach Auskunft des Herstellers vor allem daran, daß das Fahrzeug unmittelbar nach dem Einschalten des Empfängers und vor der ersten Neuberechneten Position losfuhr. Der Schlepper sollte erst abfahren, sobald der Empfänger die erste aktuelle Position ermittelt hat. Das vorzeitige Abfahren ist mit großer Wahrscheinlichkeit auch der Grund, warum die Werte für die festgestellten Zeitspannen vom Einschalten bis zur ersten Positionsausgabe über den Herstellerangaben liegen.

Auffallend ist die verringerte Anzahl registrierter Satelliten bei den Fahrten des Eingrasens im Zeitraum Juni/Juli. Als Ursache ist die eigene Technik auszuschließen, da während der ganzen Untersuchungszeit keinerlei Veränderung an den Geräten oder an der Konfiguration erfolgte. Eine Überprüfung ergab, daß während des gesamten Untersuchungszeitraums keine Satelliten außer Betrieb gesetzt oder neu in Betrieb genommen wurden [78]. Es kam zwar bei einzelnen Satelliten zu vorübergehenden Ausfällen, diese bewegten sich aber in einem Zeitraum von einigen Minuten bis zu wenigen Stunden; derartige kurzfristige Ausfälle waren relativ gleichmäßig über den ganzen Untersuchungszeitraum verteilt [77, 178].

Da die Umlaufzeit der Satelliten etwas weniger als 12 h beträgt, erscheinen die einzelnen Satelliten jeden Tag vier Minuten früher; die Satellitenspuren auf dem Erdkörper wandern pro Tag ca. 1° westwärts [38]. Deshalb verändert sich die Satellitenkonstellation nicht nur im Tagesablauf, sondern im geringeren Maße auch von Tag zu Tag. Diese Verschiebung wurde mit Hilfe eines Planungsprogramm für Positionsermittlungen mit GPS (*GPS Multi-Site Mission Planning*, Version 3.0 von ASHTECH) und Almanachdaten ausgewertet. Für den Versuchsstandort ließ sich die Anzahl an verfügbaren Satelliten berechnen: In den späten Nachmittagsstunden der zweiten Junihälfte und des Monats Juli, während des Eingrasens, waren öfters längere Phasen mit relativ wenig verfügbaren Satelliten zu verzeichnen. Durch die tägliche Verlagerung der Satellitenbahnen fielen die Phasen mit wenig registrierbaren

Satelliten ab etwa Anfang August nicht mehr in den täglichen Aufzeichnungszeitraum, die Anzahl an erfaßten Satelliten stieg wieder an.

Weitere größere Abweichungen der Anzahl an erfaßten Satelliten vom Mittelwert, wie etwa Anfang September oder Anfang Oktober, konnten mit Hilfe der Mission Planning-Software erklärt werden. Die beiden Ausreißer, die in der Mitte des Monats Juli (Fahrt Nummer 69 und 70) zu finden sind, gehen auf den Schlepperfahrer zurück. Diese Aufzeichnungen fanden an dem Tag statt, an dem die Feststation irrtümlich abgeschaltet war. Der Schlepperfahrer bemerkte, daß die Ortung nicht differentiell, sondern nur im Standardmodus erfolgte. Er überprüfte deshalb die Ortungseinrichtung auf dem Schlepper, während die Datenaufzeichnung lief. Diese längeren Überprüfungen fanden zufällig an Orten statt, an denen keinerlei Signalabschattungen auftraten. Dadurch wurde der Durchschnittswert für die Anzahl an erfaßten Satelliten erhöht.

Trotz laufender Feststation war die differentielle Ortung nicht immer möglich. Eine Ursache ist die Abschattung der Funksignale der Feststation. Darauf deuten die Ergebnisse der Fahrten des Eingrasens auf der Allee hin: Im Durchschnitt der Fahrten betrug der Anteil der Ortung im Standardmodus annähernd 3 %, auf dem Abschnitt ohne Randbepflanzung nur 0,2 %. Ausfälle der Ortung im differentiellen Modus waren auch auf die Feststation zurückzuführen. Das Ausgabeintervall von 2 s für die Korrekturinformationen wurde nicht immer eingehalten. War die Anzahl an verfügbaren Satelliten niedrig, so kam es bei der Feststation von NOVATEL öfters vor, daß sich die Abstände zwischen den Datenausgaben deutlich erhöhten und teilweise zu groß wurden. Dadurch ging vor allem in der zweiten Junihälfte und im Monat Juli der Anteil der differentiellen Ortung zurück.

4.4.3 Genauigkeit der Positionsermittlung

Im Bezug auf die Genauigkeit der Ortung stand weniger die exakte Bestimmung von Ortungsfehlern im Mittelpunkt, es wurde vielmehr überprüft, ob die beiden typischen GPS-Empfänger den Anforderungen an die Genauigkeit bei landwirtschaftlichen Einsätzen gerecht werden.

Bei den Versuchen mit dem FURUNO GN-72 wurde die in Tabelle 3 geforderte Ortungsgenauigkeit von 2 bis 5 m nur teilweise erfüllt. Die bei 260 Fahrten zum Eingrasen ermittelte

Streuung erstreckte sich weit über diesen Grenzwert hinaus. Beim Abfahren im Hofbereich traten die größten Abweichungen auf. Der Hauptgrund für diese Differenzen von z.T. mehr als 50 m war, daß der Schlepper bevor die erste Position vom Empfänger errechnet wurde losfuhr. Dieser Sachverhalt wird zusätzlich durch die stark gebündelten Fahrten von der Hofstelle weg in Abbildung 23 verdeutlicht. Im Alleebereich war die Signalabschattung durch die Bäume für die größeren Ortungsfehler verantwortlich. Die Glättungs- und Extrapolationsalgorithmen wirkten sich bei Richtungswechsel nach hohen Fahrgeschwindigkeiten negativ aus.

In anderen Untersuchungen werden für Empfänger mit ähnlichen technischen Merkmalen wie beim FURUNO GN-72 Ortungsfehler in einer Größenordnung von nur wenigen Metern angegeben [24, 140]. Dabei handelt es sich aber um Ergebnisse von Ertragsermittlungen auf dem Feld. Es ist anzunehmen, daß bei diesen Versuchen vor dem Losfahren der Erntemaschinen die Empfänger schon längere Zeit in Betrieb waren, erntetübliche Geschwindigkeiten von unter 10 km/h vorlagen und keine gravierenden Abschattungen auftraten. Unter derartigen Einsatzbedingungen liegen nach den Ergebnissen des Presseneinsatzes vom 29.6.1995 die Ortungsfehler des FURUNO-Empfängers mit überwiegend etwa ± 4 m innerhalb der geforderten Grenzen. Größere Ortungsfehler auf dem Feld sind dennoch nicht ganz auszuschließen; beim Fahrzeugstop zum Rüsten zeigte sich eine Ungenauigkeit von beinahe 10 m.

Die Ursache des "Treppeneffekts" im Fahrweg auf der Grafwiese (siehe Abb. 27) ist die geringe zahlenmäßige Auflösung der ausgegebenen Positionswerte: Eine Änderung der letzten Nachkommastelle um einen Punkt entspricht einer Positionsänderung von 1,2 m bei der geographischen Breite und 1,8 m bei der Länge. Bei den Stopps zum Binden schwankt die Positionsausgabe in der letzten Nachkommastelle um bis zu ± 2 Punkte und führt deshalb zu Ortungsfehlern von bis zu $\pm 3,6$ m. Beim ASHTECH-Empfänger bewirkt eine Veränderung der letzten Nachkommastelle um eine Positionänderung im Millimeterbereich; sie kommt deshalb nicht zum Vorschein. Der Fahrweg ist darum wesentlich übersichtlicher und leichter nachzuvollziehen.

Der Vergleich zwischen dem handvermessenen Schwadverlauf und dem vom ASHTECH-Empfänger festgestellten Fahrweg ergab Abweichungen von maximal 70 cm. Die Ursache für diese Differenzen beruht weniger auf Ortungsfehlern, sondern auf dem Unterschied zwischen Schwadverlauf und Fahrweg: Damit eine optimale Ballenform erreicht werden kann, ist es nötig, daß der Schwad nicht nur mittig, sondern auch über die linke und rechte Seite der Pick-up zu den Pressorganen geführt wird. Dies erfordert ein schlangelinienartiges Fahren

über den Schwad. Die dabei auftretenden seitlichen Abweichungen von der Schwadmittellinie liegen in einer Größenordnung von bis zu $\pm 0,5$ m. Für die Ortungsfehler verbleiben deshalb Werte, die erheblich kleiner sind als $\pm 0,5$ m. Die größere Differenz zwischen ermittelter Fahrspur und ausgemessener Schwadlage beim dritten Schwad im nordwestlichen Schwadbereich ist auf ein Vorbeifahren am Schwad zurückzuführen.

Die genaue Ortung durch den ASHTECH-Empfänger beruht zum einem auf seinem hohen Leistungsvermögen, zum anderen an der Positionsdatenkorrektur im Post Processing [119]. Den Einfluß der dazu verwendeten Software zeigte die Analyse des Fahrweges, dessen Rohdaten mit unterschiedlichen Programmversionen korrigiert wurden (siehe Abb. 29). Die Ortungsfehler reduzierten sich von etwa ± 4 m auf weniger als $\pm 0,5$ m. Bleiben Positionsrohdaten erhalten, so ist es möglich, den Fortschritt in der Entwicklung der Post Processing-Software zu nutzen und höhere Ortungsgenauigkeiten zu erzielen.

Die Ortung im differentiellen Modus, ob in Echtzeit oder im Post Processing, ist unter der gegenwärtigen Raumsegmentkonfiguration stets erforderlich. Dieser Zusammenhang wurde zwar nicht speziell untersucht, aber die ermittelten Positionen beim Eingrasen an dem Tag, an dem die Feststation außer Betrieb war, veranschaulichen bereits deutlich, daß eine Ortung ohne Korrektur zu ungenau ist (siehe Abb. 24).

Die Ergebnisse zeigen den Zusammenhang zwischen der Ortungsgenauigkeit und den PDOP-Werten. Die ermittelten Fahrspuren vom Eingrasen weisen im Untersuchungszeitraum die geringsten Fehler bei den Rückfahrten im baumfreien Bereich vor Mitte Juni und ab Anfang August auf, also während der Phasen mit den geringeren PDOP-Werten.

Unter exakt den selben Einsatzbedingungen können unterschiedliche Empfänger zu verschiedenen Angaben für den PDOP kommen. Der Vergleich zwischen den beiden verwendeten Empfängern beim Einsatz der Rundballenpresse ergab, daß das Gerät von ASHTECH bei den unterschiedlichen Anzahlen an erfaßten Satelliten immer geringere PDOP-Werte feststellte als der FURUNO GN-72. Als Hauptursache kommt hier eine unterschiedliche Zusammensetzung der jeweils registrierten Satelliten in Frage, die empfänger- und antennenbedingt ist. Unterstützt wird diese Annahme von der Feststellung, daß die Häufigkeitsverteilung der Anzahl erfaßter Satelliten zwischen den beiden Empfängertypen sehr unterschiedlich war.

Nicht zu übersehen ist die Korrelation zwischen PDOP und Anzahl registrierter Satelliten und auch der Zusammenhang zwischen Ortungsgenauigkeit und Satellitenzahl. Eine große Anzahl an Satelliten führt zu niedrigen PDOP-Werten und damit zu einer höheren Ortungsgenauigkeit. Für eine zufriedenstellende Ortung ist deshalb nicht nur die für die Positionsermittlung erforderliche Mindestanzahl an Satelliten ausschlaggebend, sondern auch die Anzahl an Satelliten, die darüber hinaus registriert werden können. Dies brachten die Fahrweganalysen im Alleeteilstück deutlich zum Ausdruck.

5 Arbeitszeiterfassung

Eine detaillierte und exakte Erfassung der Arbeitszeit und ihrer Einflußfaktoren, die ohne einen zusätzlichen Zeitnehmer automatisiert ablaufen kann, erfordert eine entsprechende technische Ausstattung der Maschinen. Da GPS als Zeitgeber fungieren kann und mit ihm die Ermittlung eines Teils der Einflußgrößen auf die Arbeitszeit denkbar ist, bietet sich diese Ortungseinrichtung als tragendes Element des Erfassungssystems an. Das Erfassungssystem muß im Fahrzeug bereits vorhandene Sensorik - so weit erforderlich - integrieren, damit der technische und finanzielle Aufwand der Sensorikergänzung möglichst gering ausfällt. Eine automatisierte Analyse der erhobenen Daten erfordert eine Identifizierung der einzelnen Arbeits-/Prozeßelemente, eine Berechnung ihrer Dauer und die Bestimmung von Einflußfaktoren. Sie soll auch finale Betrachtungen ermöglichen.

Alle Untersuchungen sollten von Anfang an auf einem praktischen Betrieb durchgeführt werden, damit eine Eignungsüberprüfung des automatisiert arbeitenden Erfassungssystems für den alltäglichen landwirtschaftlichen Einsatz möglich war.

5.1 Methodenerweiterung und Versuchsdurchführung

Der Entwicklungsaufwand für einen Prototypen, der bereits alle Arbeits-/Prozeßelemente und Einflußfaktoren erfassen, analysieren und davon Arbeitsarten ableiten kann, wäre außergewöhnlich hoch. Deshalb wurden zunächst aus der Liste aller beim Einsatz der Rundballenpresse möglichen Arbeits-/Prozeßelemente einige, die ermittelt werden sollten, ausgewählt und die dazu erforderlichen Meßgrößen bestimmt.

5.1.1 Festlegung der zu erfassenden Arbeitsabschnitte und Einflußgrößen

Ausgehend von Tabelle 4 erfolgte die Auswahl der Zeitelemente. Von Beginn an wurden die Elemente "Rüstarbeiten für die Presse" vor dem Anhängen, "Presse anhängen" sowie "Presse abhängen" ausgeklammert, da eine Erfassung mit einem nicht allzu komplexen System nur möglich ist, wenn die Presse angehängt ist und eine Verbindung zu ihren Sensoren besteht. Deshalb beginnt die Ermittlung erst mit der Fahrt vom Hof zum Schlag und endet nach Arbeiterledigung mit der Wiederankunft auf dem Hof. Desgleichen wurde auf die

Identifizierung des Rüstens auf dem Feld ("Presse zum Pressen vorbereiten" und "Presse zur Fahrt vorbereiten") verzichtet, da eine sehr aufwendige Entwicklung von Erkennungsalgorithmen für diese beiden Elemente erwartet wurde. Eine Aufgliederung in technisch, organisatorisch oder persönlich bedingte Unterbrechungen wurde aufgrund der schwierigen Realisierung nicht durchgeführt. Die ausgewählten Arbeitsabschnitte mit ihren Anfangs- und Endpunkten sind in Tabelle 14 aufgelistet.

Tabelle 14: Anfangs- und Endpunkte zur Abschnittsabgrenzung beim Rundballenpressen.

Arbeits-/Prozeßelementname	Anfang	Ende
Fahrt Hof - Feld (Traktor leicht belastet)	Beginn Fahrt	erstes Gut aufnehmen
Pressen mit Rundballenpresse (Gutaufnahme)	erstes Gut aufnehmen	letztes Gut aufnehmen
Rundballen binden (mit Ballen auswerfen)	letztes Gut aufnehmen	erstes Gut aufnehmen
Wenden/Leerfahrt mit Presse	letztes Gut aufnehmen	erstes Gut aufnehmen
Fahrt Feld - Hof (Traktor leicht belastet)	Ende Binden	Ende Fahrt
Unterbrechung des Arbeitsganges	AP verläßt Schleppersitz	AP zurück auf Schleppersitz oder Beginn einer Fahrt

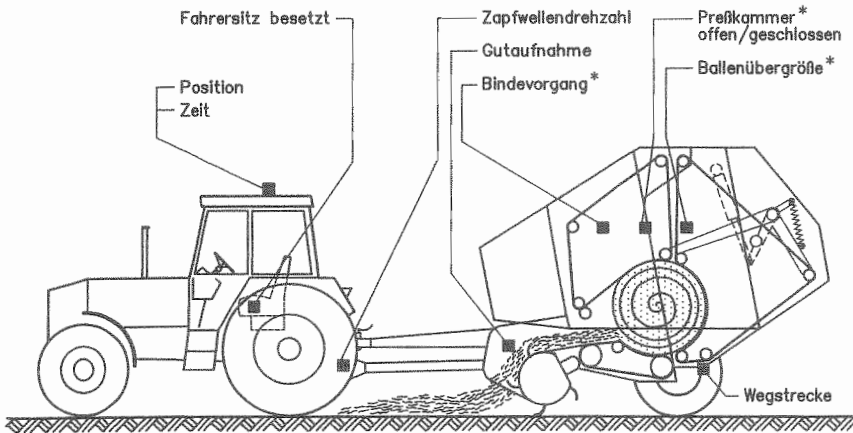
Einige Anfangs- und Endpunkte wurden aufgrund der vorgegebenen Anforderungen abgeändert. Da Rüsten auf dem Feld ausgeklammert ist, endet die Fahrt vom Hof zum Schlag mit der ersten Gutaufnahme. Die Rückfahrt beginnt nach dem Ende des letzten Bindens. Bei der Unterbrechung wurden das Absteigen und Aufsteigen der Arbeitsperson als Anfangs- bzw. als Endpunkt hinzugenommen, damit Unterbrechungen während des Bindens, die ein Absteigen erforderlich machen, auch erfaßt werden konnten.

Mit Ausnahme von "Art des Ballenbindens" und "Rüsten" wurde versucht, alle wesentlichen Einflußgrößen (siehe Kap. 2.2.2) automatisch zu ermitteln. Der Grund für die Ausgrenzung des Rüstens wurde bereits aufgeführt; auf eine Erfassung der Art des Ballenbindens wurde verzichtet, da nur eine Netzbindung durchgeführt werden konnte. Die Ausführungen zur Ermittlung der Ballengröße bzw. -masse und der wirksamen Arbeitsbreite sind im Kapitel über die Ertragsermittlung zu finden (Kap. 6).

Für die finale Arbeitszeitanalyse sollten alle Arbeitsarten mit Zeiten und die Gesamtzeit von den Zeitelementen abgeleitet werden.

5.1.2 Meßgrößen, Sensorikergänzung und Datenerfassungstechnik

Bei der Wahl der zu ermittelnden Meßgrößen wurden vorzugsweise solche herangezogen, die mit den bereits serienmäßig installierten Sensoren der Rundballenpresse und des Schleppers erfaßt werden könnten. Dadurch sollte die zusätzliche Sensorikergänzung möglichst gering ausfallen. Zur Erfassung in der JOHN DEERE-Rundballenpresse und im FENDT-Schlepper wurden die in Abbildung 30 dargestellten Meßgrößen ausgewählt.



* wird von serienmäßiger Standardausrüstung erfaßt

Abbildung 30: Meßgrößen an der Rundballenpresse und am Schlepper bei der automatisierten Arbeitszeiterfassung.

Zur Datenaufzeichnung wurde die von den Ortungsversuchen her bekannte Aufzeichnungstechnik entsprechend erweitert (Abb. 31).

Bei den Dataloggern handelt es sich um mehrkanalige Datensammelstationen. Der IMP 35951B erfaßt analoge, der IMP 35952A digitale Daten. In Abhängigkeit von der zu messenden Größe, wurden die Sensoren an einen der beiden IMP angeschlossen. Datalogger und Speicher-PC sind über ein zweiadriges Buskabel miteinander verbunden. Diese Verbindung, genannt "S-Net", gewährleistet die Spannungsversorgung für den Betrieb und den Datentransfer.

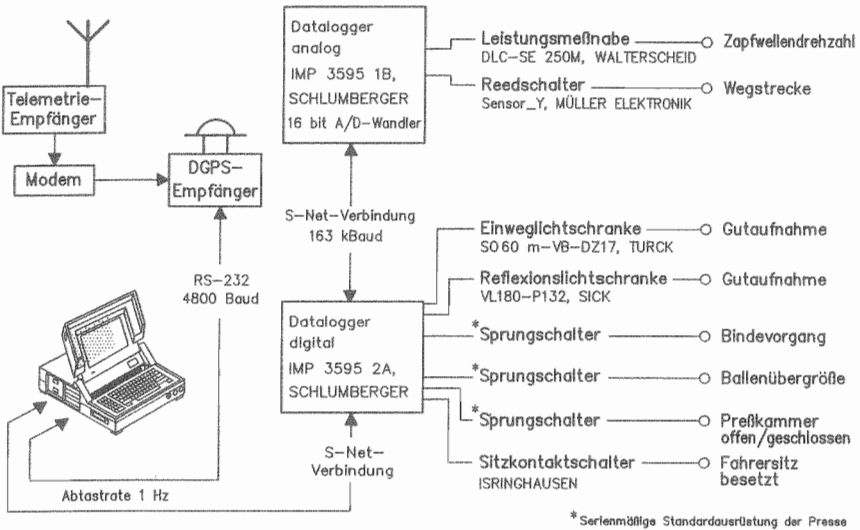


Abbildung 31: Sensorik und Datenaufzeichnungstechnik für Schlepper und Rundballenpresse zur automatisierten Arbeitszeiterfassung.

Zur Ermittlung der Gutaufnahme wurden an die Pick-up eine Einweg- und eine Reflexionslichtschranke angebracht, die parallel und unabhängig voneinander betrieben wurden. Der Strahler der Einweglichtschranke befand sich zu Beginn der Versuche oben, auf der linken Seite der Pick-up, genau gegenüber war der dazugehörige Empfänger angebracht. Später wurde diese Schrankenanlage mit Hilfe von Verlängerungsarmen ca. 20 cm vor der Pick-up montiert. Die Höhe über dem Boden konnte dabei variabel eingestellt werden, wobei sie meistens etwa 30 cm betrug. Die Reflexionslichtschranke war in der Mitte der Deichselunterseite befestigt und zu einem Reflektor auf der Pick-up-Mitte hin ausgerichtet.

Die Signale für den Zustand der Presskammer (geschlossen oder offen), für das Ballenbinden (kein Binden / Binden steht kurz bevor / Binden läuft) und für die Ballenübergröße (Ballengröße liegt unter oder über Grenzwert) wurden vom Ballenbildungsmonitor der Presse durch Spannungsmessung mit Hilfe des IMP abgegriffen.

Über den Sitzkontaktschalter im Fahrersitz des Schleppers erfolgte die Feststellung, ob der Sitz durch den Fahrer besetzt war.

Mit der Leistungsmeßnabe wurde festgestellt, ob die Zapfwelle eingeschaltet bzw. die Presse in Betrieb war. Sie war in der Gelenkwelle integriert.

Zusätzlich zur Distanzenermittlung über GPS wurde der zurückgelegte Weg über Reed-schalter an den Rädern der Presse ermittelt. Dazu waren an der Felge des linken und des rechten Rades jeweils vier Magnete angebracht. Ein Impuls entsprach bei leerer Presse einer Wegstrecke von 61,9 cm.

Neben dem Gerät von FURUNO kam zur Positionsermittlung auch die Anlage von ASH-TECH zum Einsatz.

5.1.3 Datenerfassungssoftware

Zur Aufzeichnung aller Daten wurde das Programm *rb* (© K. Wild 1995) entsprechend erweitert. Mit der Version *rb7_0* werden nun neben dem FURUNO-Empfänger auch die beiden IMP-Datalogger initialisiert. Dazu wird zunächst das S-Net aktiviert und jeder Kanal der beiden IMP auf seine zu erfassende Meßgröße eingestellt.

Anschließend sucht das Programm nach der zuletzt auf der Festplatte geschriebenen Meßwertedatei (erkennbar an der Nummer im Dateinamen) und legt eine neue Datei an, deren Namen die nächsthöhere Nummer enthält. Zum Aufzeichnen einer Datenzeile werden zuerst die Daten des GPS-Empfängers dann die Meßwerte der beiden IMP abgerufen und schließlich im ASCII-Format auf die Festplatte geschrieben.

5.1.4 Versuchsdurchführung und Referenzmessungen

Die Versuche mit der Rundballenpresse liefen ähnlich ab, wie die Untersuchungen zur Ortung. Unmittelbar vor der Abfahrt des Schleppers von der Hofmitte, nach dem Anhängen der Presse, begann die Aufzeichnung der Daten; sie endete nach der Wiederankunft an der selben Stelle auf dem Hof, vor dem Abhängen der Presse. Durch einen Tastendruck des Schlepperfahrers am PC wurde die Aufzeichnung gestartet. Da parallel zu diesen Untersuchungen auch Wägeversuche liefen, kam es zu einer geringfügigen Abweichung vom regulären Ablauf des Pressens: Unmittelbar vor und nach dem Ballenauswerfen stand das

Gespann für kurze Zeit still. Ansonsten verursachte die Versuchsdurchführung keinerlei Beeinträchtigungen beim Einsatz der Rundballenpresse.

Nach dem Versuchseinsatz wurden die gewonnen Meßdaten vom Erfassungs-PC mit Hilfe einer Diskette auf einen Bürorechner zur weiteren Verarbeitung übertragen.

Referenzmessungen dienten zur Genauigkeitsüberprüfung der automatisierten Datenerfassung. Nach den Richtlinien der REFA 1971 [135] wurden mit einer Stoppuhr die Zeiten beim Presseneinsatz gemessen und handschriftlich auf Zeiterhebungsformularen festgehalten. Als Zeiteinheit diente die in der Arbeitswissenschaft übliche Zentiminute (1 Zentiminute = 1 cmin = $\frac{1}{100}$ Minute). Die Schwadlängen wurden mit einem Stahlbandmaß ermittelt.

5.2 Entwicklung des Programms *SATAZA* zur automatisierten Arbeitszeitdatenanalyse

Das entwickelte Erfassungssystem führt zu großen Datenmengen, die auf manuellem Weg nicht mehr effektiv analysiert werden können. Deshalb ist ein entsprechendes Computerprogramm zur Auswertung erforderlich. Es gibt eine Vielzahl vielseitig einsetzbarer und konfigurierbarer Analysesoftware, wie z.B. Tabellenkalkulationsprogramme, aber eine Analyse mit ihnen wäre nur mit einer sehr komplexen und aufwendigen Makroprogrammierung zu verwirklichen. Außerdem weisen derartige Programme Schwachpunkte in der graphischen Analyse und Darstellung auf. Mit einem GIS wäre zwar eine graphische Analyse und Ergebnisdarstellung gut möglich, aber eine Ermittlung der Arbeits-/Prozeßelemente aus den erfaßten Daten wäre nur schwer zu realisieren oder gar unmöglich. Deshalb wurde zur Auswertung der automatisiert erfaßten Dateien mit GPS-Positionen und anderen Sensorwerten das Programm "*SATAZA* (Satellitengestützte Arbeitszeitanalyse)" (© K. Wild und C. Paul 1996) entwickelt.

5.2.1 Anforderungen an den Prototypen

Über das Zwischenziel der Realisierung einer manuellen Auswertung sollte ein vollautomatisiert arbeitendes Analyseprogramm entstehen. Im einzelnen wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Die **Bedienung** soll **schnell und einfach** mit einer Maus möglich sein.
- Das Modul für eine **manuelle Auswertung** ist mit geeigneten Such- und Analysewerkzeugen auszustatten. Es soll in erster Linie zur Überprüfung der automatisiert ermittelten Ergebnisse und zur Weiterentwicklung von Analysealgorithmen für die vollautomatisierte Auswertung dienen. Der gesamte Arbeitsablauf beim Einsatz der Presse soll erkennbar werden und nachzuvollziehen sein; Arbeits-/Prozeßelemente müssen identifiziert und analysiert werden können (auch von einer Person, die beim Feldeinsatz nicht anwesend war).
- Die **vollautomatisierte Auswertung** soll komplett selbständig ablaufen, wobei sich die Aufgabe des Benutzers auf die Auswahl der zu analysierenden Datei beschränkt.
- Die **Ergebnisse** sollen **graphisch und tabellarisch** dargestellt werden. In der Graphik ist der Fahrweg sichtbar zu machen, wobei zur einfachen Erkennung der Arbeits-/Prozeßelemente der Fahrweg in Abhängigkeit von der jeweils verrichteten Arbeit unterschiedlich farbig gestaltet sein soll. In der tabellarischen Form soll eine Ausgabe sowohl in einer einfachen zusammenfassenden, als auch einer detaillierten Aufstellung erfolgen.
- Neben der Standardausgabe in graphischer und tabellarischer Form sollen auch **Schnittstellen** geschaffen werden, die eine Datenweitergabe zu *AutoCad* (graphische/geographische Analysen), zu Ackerschlagkarteien (finale Analysen) und zu spezialisierten Arbeitszeitdatenbanken (Planzeiterstellungen), wie z.B. *LISL* [21], ermöglichen.
- Durch eine entsprechende Programmstruktur muß eine **Einbindung zusätzlicher Module** schnell und einfach möglich sein, so daß auch Daten, die bei anderen Maschinen, wie z.B. Ladewagen oder Mährescher, erhoben wurden, analysiert werden können.

5.2.2 Auswahl des Betriebssystems und der Programmiersprache

Neben der Eignung zur Erfüllung dieser Anforderungen war ein weiteres Kriterium bei der Auswahl der Software-Werkzeuge ihr Angebot an passenden, vorgefertigten Modulen und Schnittstellen. Diese sollten zur Reduzierung des Programmieraufwands beitragen.

Betriebssystem

Beim Betriebssystem fiel die Wahl auf *Windows* von MICROSOFT, da die Alternativsysteme *MS-DOS* und *UNIX* im Hinblick auf die Zielsetzung gewisse Schwächen aufweisen:

- Nachteilig von *MS-DOS* ist das schlechte Arbeitsspeichermanagement, das vor allem bei größeren und komplexeren Programmen zu erheblichen Problemen führen kann. Außerdem ist dieses Betriebssystem hinsichtlich des Einsatzes von graphischen Benutzeroberflächen und Ergebnisausgaben weniger geeignet.
- Diese Einschränkungen treten bei *UNIX* nicht auf. Die Arbeitsspeicherverwaltung ist selbst bei umfangreicheren Anwendungen sicher zu handhaben. Für dieses Betriebssystem sind auch graphische Benutzeroberflächen vorhanden, aber die Einbindung selbstentwickelter Programme ist oft mit größerem Aufwand verbunden, da nur wenig vorgefertigte und einheitliche Module zur Verfügung stehen. Außerdem kommt dieses Betriebssystem auf dem PC nur selten zum Einsatz.

Bei *Windows* treten die aufgezeigten Nachteile nicht auf. Es zeichnet sich durch eine selbst-erklärende graphische Oberfläche aus, über welche die Anweisungen sehr leicht an ein Programm übermittelt werden können. Das Speichermanagement ist wesentlich effektiver als bei *MS-DOS*, Engpässe treten selten auf. Außerdem gibt es eine Vielzahl an fertigen Routinen, die eine Programmerstellung wesentlich beschleunigen.

Prozedurale Programmiersprachen

Unter der zunehmenden Zahl an Programmiersprachen gibt es zwei Gruppen, die für die gestellte Aufgabe in Frage kommen. Zur ersten Gruppe zählen sogenannte prozedurale Sprachen wie *Basic*, *Fortran* oder *Pascal*. Kennzeichnend für sie ist die strenge Reihenfolge in der die Programmanweisungen (Prozeduren) abgehandelt und die Daten verarbeitet werden. Bei der Speicherung wird zwischen den Daten und den Prozeduren eine strikte Trennung eingehalten. Diese Programmiersprachen sind äußerst vielseitig und aufgrund ihres hohen Leistungsvermögens für ein breites Einsatzspektrum geeignet. Allerdings haben sie deutliche Nachteile:

- Geringfügige Änderungen im Programm erfordern meist wieder einen kompletten Compilierungsprozess und ziehen häufig weitere, z.T. aufwendige Arbeiten nach sich.
- Der übliche Gebrauch von Sprunganweisungen mit Datenweitergabe erschwert den modularen Aufbau eines Programms.
- Es gibt nur wenige leicht einzubauende Module zur Realisierung einer benutzerfreundlichen "Fenster-technik", die graphischen Darstellungsmöglichkeiten sind oft sehr begrenzt.

Objektorientierte Programmiersprachen

Auf völlig neuen Konzepten basieren die Sprachen der zweiten Gruppe, die objektorientierten Programmiersprachen. Dazu zählen z.B. *C++* oder *Smalltalk*. Anders als bei den Vertretern der prozeduralen Gruppe, gibt es bei ihnen keine Trennung von Prozeduren und Daten, ebensowenig existiert eine strenge Ablaufreihenfolge.

Die objektorientierte Programmierung (OOP) ähnelt in ihrem Ablauf sehr stark den Vorgängen der realen Umgebung des Menschen: Eine mehr oder weniger große Anzahl einzelner **Objekte** kommuniziert untereinander: sie agieren, reagieren, tauschen Botschaften untereinander aus. Bei der OOP haben diese Objekte genau definierte Rollen, Grenzen und Schnittstellen. Die Schnittstelle eines Objekts entsteht durch **Methoden**, die mit den Funktionen oder Prozeduren bei prozeduralen Programmiersprachen vergleichbar sind.

Während manche Eigenschaften der OOP auch durch prozedurale Sprachen emuliert werden können, gibt es einige besondere Kennzeichen, die nur bei der OOP vorhanden sind: **Verkapselung**, **Vererbung** und **Polymorphismus** [46].

Als **Verkapselung** wird die Verschmelzung von Daten und dem Computercode, der die Daten erzeugt oder verarbeitet, zu einer Einheit bezeichnet [174]. Diese Einheit ist das bereits erwähnte Objekt. Der Zugang zu dem Code oder den Daten eines Objekts erfolgt mit Hilfe der Methoden. Für den Anwender ist es deshalb unerheblich zu wissen, ob eine abgefragte Information innerhalb eines Objekts berechnet wurde oder aus abgespeicherten Archiven stammt.

Durch die Verkapselung und die exakte Schnittstellendefinition sind die Objekte gegenüber ihrer Umgebung vollkommen abgeschottet und reagieren nur auf die ihnen zugesandten Botschaften. Ohne Kenntnisse über die inneren Vorgänge eines Objekts ist deshalb ein Austausch zwischen Programmen möglich, da keine Seiteneffekte auftreten können. Diese Modularität ist vergleichbar mit der eines integrierten Schaltkreises: Durch Kenntnis der Anschlüsse und seiner Funktion kann er zusammen mit anderen in unterschiedlichste, größere Schaltkreise eingebaut werden.

Objekte werden hierarchisch gegliedert, die Objekte einer Ebene gehören einer **Klasse** an. Eine Klasse kann eine oder mehrere Unterklassen besitzen.

Durch **Vererbung** übertragen die Klassen (Vorfahren) ihre Eigenschaften auf die Unterklassen (Abkömmlinge). Veränderungen in einer Klasse werden automatisch auf die Unterklassen übertragen und ersparen deshalb sehr viel Programmieraufwand. Aufgrund der Vererbung müssen identische Methoden nicht neu programmiert werden; es reicht die Einrichtung einer neuen Unterklasse aus. Außerdem können die Abkömmlinge mit zusätzlichen Methoden versehen werden. Die Vererbung fördert die Modularität und unterstützt eine effektive Softwareentwicklung.

Polymorphismus erlaubt, daß zwei oder mehrere Objekte über die selbe Schnittstelle verfügen. Dadurch kann die selbe Botschaft bei den unterschiedlichen Objekten zu unterschiedlichen Reaktionen führen.

Vorteile von C++

Aufgrund der geschilderten Vorteile wurde für die Softwareentwicklung eine objektorientierte Programmiersprache ausgewählt. Dabei bekam C++, Version 3.1 von BORLAND den Vorzug, da sie gegenüber anderen Sprachen über eine Reihe positiver Eigenschaften verfügt:

- Komfortable graphische Benutzeroberfläche für den Entwickler mit "Fenstertechnik" und Mausbedienung,
- umfangreiches Angebot an vorgefertigten Methoden und Klassen, insbesondere zur graphischen Ausgabe (Einbau von Codes der prozeduralen Vorgängersprache C möglich),
- einfache Programmierung und
- umfangreiche Entwicklerhilfe wie Debugger und Variablenmonitor.

5.2.3 Analysealgorithmen zur Identifizierung der Arbeitselemente

Die erste Teilaufgabe bestand in der Entwicklung entsprechender Algorithmen zur Identifizierung der einzelnen Arbeitsabschnitte. Während einige Arbeits-/Prozebelemente aus einer parallelen Betrachtung der Werte von mehreren Meßgrößen gefolgert werden können, lassen sich andere nur durch eine zusätzliche Einbeziehung des Arbeitsablaufes bestimmen. Die Arbeitsarten ergeben sich durch eine einfache Zusammenfassung der entsprechenden Arbeits-/Prozebelemente. Die Entwicklung der Algorithmen erfolgte mit Hilfe der Werte von

verschiedenen Einsätzen der Rundballenpresse. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse wurden Kriterienlisten zur Identifizierung der einzelnen Arbeitselemente erstellt.

Gutaufnahme: Die Gutaufnahme hat sich als das zentrale Arbeits-/Prozeßelement in der Programmentwicklung erwiesen. Wird dieses richtig erkannt, so wird die Identifizierung weiterer Elemente wesentlich erleichtert. Zur Einordnung der Arbeit als Gutaufnahme müssen folgende Bedingungen gleichzeitig zutreffen:

- Strahlengang der Pick-up-Lichtschranke ist unterbrochen
und
- Fahrgeschwindigkeit $> 2,2 \text{ km/h}$
und
- Zapfwellendrehzahl $> 0 \text{ min}^{-1}$

Die ursprüngliche Annahme, daß das Signal der Lichtschranke zur Identifizierung ausreichen würde, mußte sehr bald verworfen werden. Es traten Fälle auf, bei denen der Fahrer die Presse am Schwadanfang in den Schwad sehr weit hineinfuhr und stehenblieb, ohne Gut aufzunehmen. In dieser Position wurde durch den Schwad der Lichtschrankenstrahlengang bereits unterbrochen. Deshalb kam als zweite Bedingung die Fortbewegung hinzu.

Die Geschwindigkeit wurde dabei über die Impulzzählung am Reedschalter der Felgen ermittelt. Der Wert von $2,2 \text{ km/h}$ entspricht einem Impuls pro Sekunde. Es wurde bewußt " $> 1 \text{ Impuls/s}$ " und nicht " $> 0 \text{ Impulse/s}$ " gewählt, da bei der gewählten Applikation der Reedschalter und Magnete trotz Fahrzeugstillstand eine unerwünschte Impulsauslösung infolge von Maschinenvibrationen manchmal zu verzeichnen war.

Das dritte Kriterium, die Zapfwellendrehzahl, wurde gesetzt, damit Leerfahrten bei sehr hohen Stoppeln, die ein Lichtschrankensignal auslösen könnten, nicht als Gutaufnahme klassifiziert werden.

Zur Identifizierung werden im Programm die Daten sequentiell Zeile für Zeile betrachtet, wobei die drei vorausgehenden und die drei nachfolgenden Zeilen mit einbezogen werden. Können fünf der sieben Zeilen die Bedingungen erfüllen, wird die augenblicklich untersuchte Zeile als Gutaufnahme gewertet. Dieses Verfahren, das mit Hilfe von Voranalysen entwickelt wurde, führt zu den geringsten Abweichungen von den Referenzwerten. Es stellt eine Form der Signalglättung dar und schaltet zwei Fehlerquellen aus:

Um Verstopfungen bei der Gutaufnahme an der Pick-up zu vermeiden, verringert manchmal der Fahrer kurzzeitig die Geschwindigkeit, teilweise bis zum Fahrzeugstillstand. Die "5 aus 7"-Regel ermöglicht in diesen Situationen mit Stillstand korrekterweise die Klassifizierung der Datenzeilen als Gutaufnahme.

Die zweite Fehlerquelle beruht auf Eigenschaften der eingesetzten Meßtechnik: Aufgrund der internen Abtastroutinen gibt der IMP 35952A bei niedrigen Geschwindigkeiten gelegentlich eine "0" bei der Radumdrehungszählung aus, wodurch das Analyseprogramm fälschlicherweise einen Fahrzeugstillstand feststellen würde. Mit der "5 aus 7"-Regel wird dies verhindert.

Binden: Das Element Ballenbinden wird anhand der Kriterien

- keine Gutaufnahme
und
- Bindsensor zeigt Binden an
und
- Fahrersitz besetzt

identifiziert. Dabei handelt es sich bei genauerer Betrachtung um fünf Kriterien, weil im ersten bereits die drei Bedingungen der Gutaufnahme enthalten sind. Da beim Binden öfters Störungen auftreten, bei denen der Fahrer den Schlepper verlassen muß, wurde das Signal vom Kontaktschalter des Schlepplersitzes hinzugenommen, um das Binden von Unterbrechungen unterscheiden zu können. Auch für dieses Element wurde die "5 aus 7"-Regel angewendet, weil dadurch ausgeschlossen wird, daß ein kurzes Erheben des Fahrer vom Sitz während des Bindens, z.B. zur Entspannung der Muskulatur, als Unterbrechung eingeordnet werden kann. Zum Binden gehört auch das Ballenauswerfen, weshalb dieses Element mit dem Beginn (Gutaufnahme) des nächsten Ballens endet.

Wenden/Leerfahrten: Für dieses Zeitelement müssen zwei Bedingungen zutreffen:

- Strahlengang der Pick-up-Lichtschanke nicht unterbrochen
und
- Geschwindigkeit > 2,2 km/h

Die Zapfwellendrehzahl wurde nicht mit aufgenommen, da Wendevorgänge und Leerfahrten sowohl mit ein- als auch mit ausgeschalteter Zapfwelle stattfinden können. Die Wahl des

Geschwindigkeitsgrenzwertes basiert auf dem bereits im Abschnitt der Gutaufnahme erläuterten Grund. Wegen der ungünstigen Erfassungseigenschaften des Dataloggers bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und möglichen kurzzeitigen Strahlengangunterbrechungen, z.B. wegen sehr hoher Stoppel, wurde wieder die "5 aus 7"-Regel herangezogen.

Unterbrechung: Für die Klassifizierung einer Datenzeile als Unterbrechung wird differenziert nach Binden und nicht Binden. Läuft an der Presse das Ballenbinden ab, so wird die Unterbrechung anhand von

- Schleppersitz nicht besetzt

identifiziert. Zur Erkennung von Unterbrechungen, die nicht während des Bindens stattfinden, muß der Ablauf mit einbezogen werden. Die Unterbrechung

- beginnt mit dem ersten Auftreten von "Schleppersitz nicht besetzt" und
- endet sobald die Geschwindigkeit $> 2,2$ km/h wird.

Mit diesen Bedingungen werden in erster Linie technisch bedingte Unterbrechungen erkannt, denn der Fahrer muß zum Beseitigen von Störungen häufig den Schleppersitz verlassen.

Die Erweiterung der Kriterien für Unterbrechungen außerhalb der Bindephase erleichtert die Erkennung, wenn innerhalb eines Unterbrechungszeitraums der Fahrer den Schlepper mehrmals verläßt und wieder besteigt. Gleichzeitig werden Störungen, die nach dem Wiederbesteigen des Schleppers zusätzlich sitzend behoben werden, miterfaßt.

Fahrt Hof - Feld (inklusive Rüsten): Dieses Element ergibt sich aus dem Arbeitsablauf:

- Die Fahrt beginnt mit dem Zeitpunkt, bei dem zum ersten Mal die Geschwindigkeit $> 2,2$ km/h ist,
- die Fahrt endet mit dem Beginn der ersten Gutaufnahme.

Falls auf dem Feld ein Rüsten des Gespanns erforderlich ist, wird dieses Element aufgrund der obigen Definition der Fahrt vom Hof zum Feld zugeordnet.

Fahrt Feld - Hof (inklusive Rüsten): Abgeleitet von den Kriterien für die Anfahrt gilt für die Fahrt zurück zum Hof:

- Die Rückfahrt beginnt mit dem Ende des letzten Bindens,
- die Rückfahrt endet mit dem Beginn der letzten Stillstandsperiode in der Meßwertedatei.

Findet ein Rüsten zur Rückfahrt nach dem letzten Binden statt, so wird es gemäß dieser Definition der Rückfahrt zugeordnet.

5.2.4 Ermittlung der Zeiten für die Arbeitsarten

Die Zeiten für die einzelnen Arbeitsarten ergeben sich aus der Zusammenfassung der entsprechenden Arbeitselemente:

$$\text{Hauptzeit:} \quad t_H = \sum t_{\text{Gutaufnahmen}} + \sum t_{\text{Bindevorgänge}} \quad (2)$$

$$\text{Nebenzeit:} \quad t_N = \sum t_{\text{Wendevorgänge/Leerfahrten}} + \sum t_{\text{Netzrolle/Garn nachfüllen}} \quad (3)$$

$$\text{Wegezeit:} \quad t_W = t_{\text{Fahrt Hof zum Feld}} + t_{\text{Fahrt Feld zum Hof}} \quad (4)$$

$$\text{Rüstzeit:} \quad t_R = t_{\text{Rüsten für Fahrt Hof zum Feld}} + t_{\text{Rüsten für Fahrt Feld zum Hof}} \quad (5)$$

$$\text{Unterbrechungszeit:} \quad t_U = \sum t_{\text{Unterbrechungen}} \quad (6)$$

Eine weitere Aggregation führt zur

$$\text{Tätigkeitszeit:} \quad t_T = t_H + t_N + t_W + t_R \quad (7)$$

und schließlich zur Zeit für die Gesamtarbeit:

$$\text{Gesamtzeit:} \quad T = t_T + t_U \quad (8)$$

Bei der Nebenzeit ist auch das Nachfüllen von Bindegarn oder einer Netzrolle aufgeführt. Dieses Element trat aber bei den Versuchen nie auf und wurde auch nicht in den automatisiert erfaßten Daten ermittelt.

Wie bereits erläutert, wurde bei der automatisierten Analyse das Rüsten nicht festgestellt. Da aber bei der manuellen Analyse die Rüstzeit ermittelt wird, ist sie mit aufgelistet.

Die Zusammenfassung der Elementzeiten soll zunächst mit Hilfe von *Excel* erfolgen, da für die Erstellung des Endergebnisses der manuellen Analyse eine *Excel*-Tabelle entwickelt werden mußte. Die Realisierung in *SATAZA* ist für eine spätere Version vorgesehen.

5.2.5 Bestimmung der Einflußgrößen auf die Arbeitszeit

Die Einflußgrößen, die in Kapitel 5.1.1 zur Analyse ausgewählt wurden, werden mit verschiedenen Verfahren bestimmt:

Visuelle Analyse des aufgezeichneten Fahrweges für:

- Schlagform
- Arbeitsform
- Wendeform

Berechnungen der Distanzen und Geschwindigkeiten für:

- Schlaglänge
- Schlagentfernung
- Fahrgeschwindigkeit

Flächenberechnungen für:

- Schlaggröße

Die Bestimmung der zurückgelegten Distanzen erfolgt über eine Aufsummierung der Impulse der Reedschalter am linken und rechten Rad, wobei zum Ausgleich der unterschiedlich langen Wege der beiden Räder bei Kurven die Distanzen mit Hilfe des Mittelwertes der Impulse der beiden Reedschalter berechnet werden.

Die Fahrgeschwindigkeit wird anhand des zurückgelegten Weges und den GPS-Zeitangaben abgeleitet.

Die Flächenberechnungen werden vorerst noch mit Hilfe von *AutoCad* durchgeführt.

5.2.6 Einbindung der Analysealgorithmen und Ablauf der automatischen Analyse

Mit Hilfe der Analysealgorithmen werden in der aufgerufenen Wertedatei zuerst Hauptabschnitte ermittelt (Abb. 32).

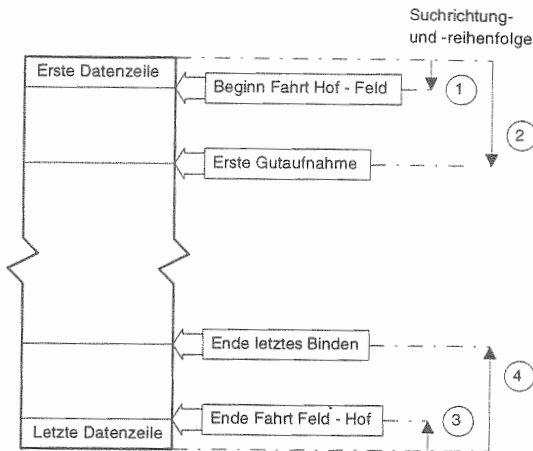


Abbildung 32: Ermittlung der Hauptabschnitte in der Meßwertedatei.

Ausgehend von der ersten Zeile in der Datei sucht *SATAZA* den Datenstring, mit dem die Fahrt vom Hof zum Schlag startete. Anschließend wird - wiederum ganz von vorne beginnend - die erste Zeile mit Gutaufnahme ermittelt. Die Suche nach dem Ende der Fahrt vom Schlag zum Hof und dem Ende des letzten Bindens beginnt dagegen mit der letzten Zeile in der Datei und verläuft in Richtung zum Dateianfang.

In dem großen Abschnitt von der ersten Gutaufnahme bis zum letzten Binden wiederholt sich immer der gleiche Vorgang, nämlich die Anfertigung eines Ballens. Dieser Block wird mit der "Ballenanalyseschleife" ballenweise in vier Ablaufsequenzen abgearbeitet, wobei für jeden Ballen die einzelnen Arbeits-/Prozeßelemente ermittelt werden (Abb. 33)

Zuerst wird für einen Ballen der Anfangs- und der Endzeitpunkt ermittelt. Den Beginn der Herstellung eines Ballens bildet per Definition die erste Gutaufnahme; die Anfertigung endet mit der Zeile, die der ersten Gutaufnahme des nächsten Ballens unmittelbar vorausgeht. Der Anfang des nächsten Ballens wird gefunden, indem die erste Zeile mit Gutaufnahme gesucht wird, die auf Sequenz "Ballenkammer geschlossen - Ballenkammer offen - Ballenkammer geschlossen" folgt. Damit ist sichergestellt, daß ein Ballen gebunden und ausgeworfen wurde und die nächste Gutaufnahme nur zu einem neuen Ballen gehören kann. Nach der Zuordnung des entsprechenden Dateibereichs zum einem Ballen werden mit dem vorher erläuterten Algorithmus die Zeilen mit dem Binden ermittelt. Beim zweiten Durchlauf werden die Wendevorgänge bzw. Leerfahrten festgestellt. Die dritte Phase dient der Feststellung von

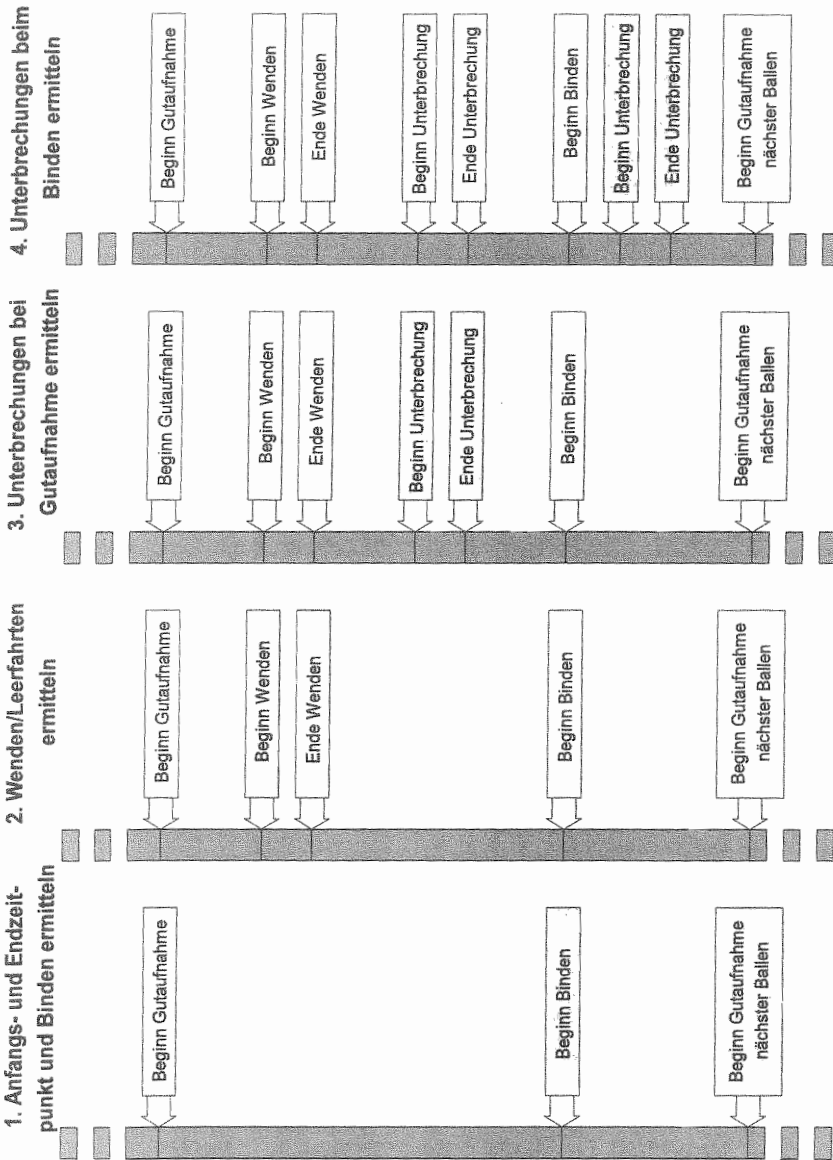


Abbildung 33: Ermittlung der Arbeits-/Prozesselemente bei einem Ballen in vier verschiedenen Ablaufsequenzen.

Unterbrechungen bei der Gutaufnahme und schließlich werden im vierten und letzten Durchlauf die Unterbrechungen beim Binden gesucht. Abschließend werden die Ergebnisse für den Ballen zusammengefaßt.

Diese Analyse in vier Ablaufsequenzen wird solange wiederholt, bis alle Ballen analysiert wurden. Danach werden die Zeitsummen für die einzelnen Arbeits-/Prozeßelemente errechnet.

5.2.7 Programmablauf am Personal-Computer

Den vollständigen Programmablauf in *SATAZA* zeigt Abbildung 34.

Im gesamten Programmablauf bietet *SATAZA* dem Benutzer durchwegs die von *Windows* her bekannte graphische Benutzeroberfläche. Die Bildschirmdarstellungen enthalten auch Standardkomponenten, die in vielen anderen *Windows*-Programmen zu finden sind. Zur Steuerung dient eine Maus, wobei ein Großteil der Befehle zusätzlich mit den Funktionstasten eingegeben werden kann. Eine fehlerhafte Bedienung des Programms ist weitgehend ausgeschlossen, da der Benutzer zur Steuerung meistens nur aus sinnvollen Vorgaben auswählen kann.

Automatische Analyse

Die Analyse der Rohdaten beginnt mit der Auswahl und dem Laden einer Datei (siehe Abb. 34). Die Datei muß für die automatische Analyse den gesamten Einsatz der Maschine - von der Abfahrt vom Hof bis zur Rückkehr zum Hof - enthalten. Beim Laden der Datei wird angezeigt, welcher Anteil bereits geladen ist und wieviel freier Arbeitsspeicher noch zur Verfügung steht. Anschließend startet die Analyse automatisch. Sobald sie beendet ist, werden die Ergebnisse am Bildschirm dargestellt (Abb. 35).

Im Vordergrund steht das Fenster mit dem Fahrweg des Gespanns, wobei bereits der Fahrweg in Abhängigkeit vom jeweils verrichteten Arbeits-/Prozeßelement unterschiedlich eingefärbt ist. Die dahinterliegenden Fenster enthalten die Ergebnisse in Tabellenform. Der Benutzer hat nun die Möglichkeit, die einzelnen Resultate genauer zu prüfen und zu beurteilen.

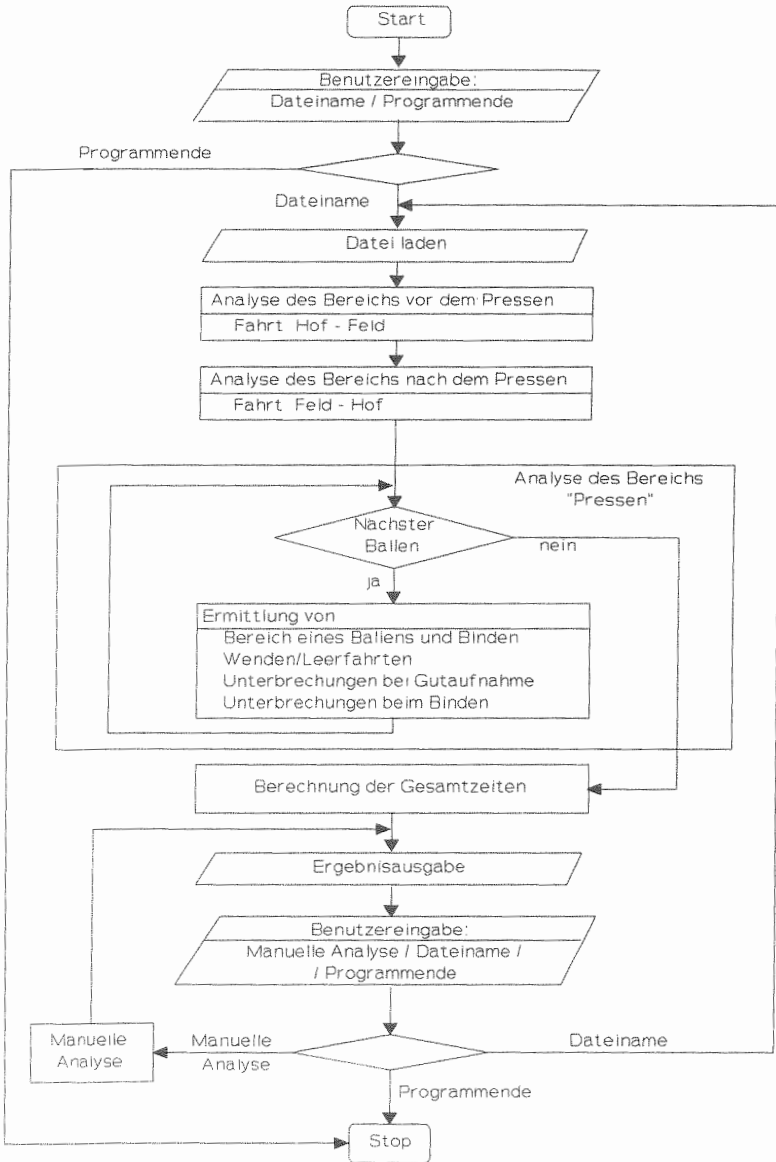


Abbildung 34: Programmablauf in SATAZA.

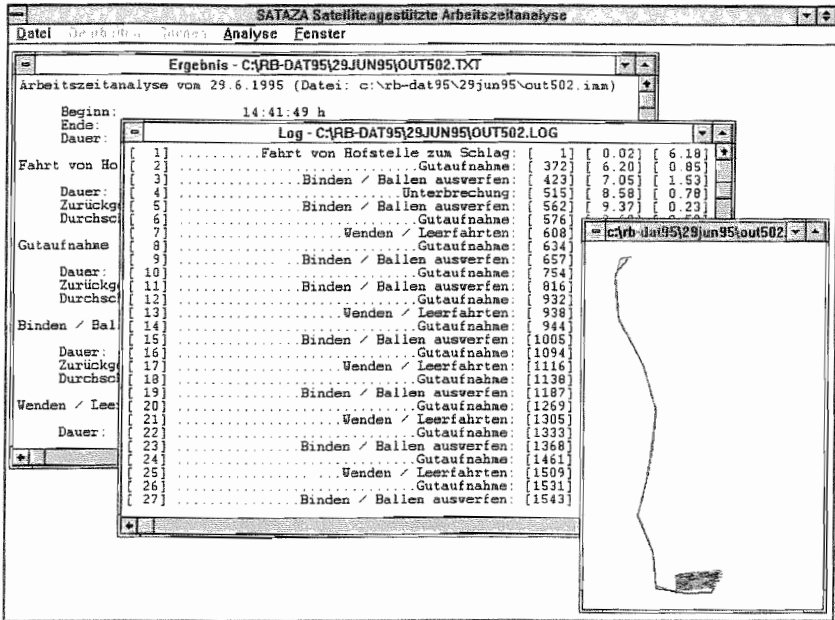


Abbildung 35: Ergebnisdarstellung in SATAZA nach Abschluß der Analyse.

Im Fahrwegfenster können durch eine "Zoom"-Funktion Teile des Fahrweges vergrößert werden (Abb. 36).

Das Fenster "Farbe ändern" enthält die Legende zum farbigen Fahrweg. Sein Inhalt zeigt an, welche Farbe für welches Arbeits-/Prozebelement steht. Es erscheint nach Auswahl des entsprechenden Eintrages aus dem "Pull-Down"-Menü von "Analyse".

Neben der Darstellung im Linienformat kann der Fahrweg auch durch die einzelnen Positionspunkte aufgezeigt werden. Bei dieser Form erlaubt eine zusätzliche Option, daß jeder Positionspunkt mit seiner Zeilennummer aus der Wertedatei beschriftet wird. Dadurch kann die zu einem Positionspunkt gehörende Datenzeile relativ leicht gefunden werden.

Eine direkte Ausgabe des Fahrweges auf einen Drucker ist nicht durchführbar. Über die *Windows*-Zwischenablage kann aber die Graphik in ein *Windows*-Graphikprogramm kopiert und schließlich gedruckt werden. Durch Anklicken des entsprechenden Befehls im "Pull-Down"-Menü von "Analyse" ist die Weitergabe des Fahrweges über die eingebaute

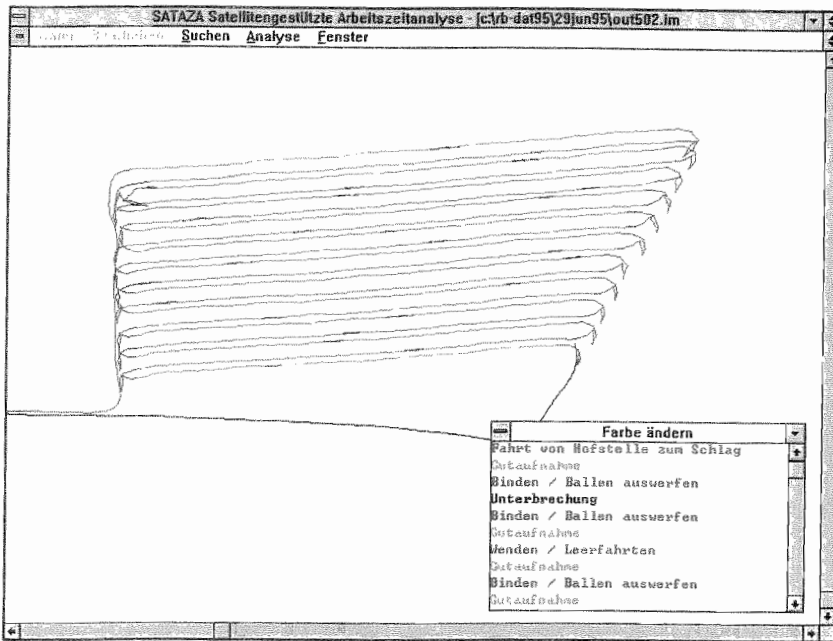


Abbildung 36: Graphische Ausgabe des Fahrweges mit Arbeits-/Prozebelementlegende.

Schnittstelle auch an *AutoCad* möglich. Dort können Ausdrücke erstellt oder weitere Analysen durchgeführt werden.

Die erste tabellarische Ergebnisausgabe der Arbeitszeitanalyse, die der Arbeitsablaufdatei nach REFA 1971 [135] und AUERNHAMMER 1975 [14] entspricht, ist die "Log-Datei" (Abb. 37).

Sie beginnt mit dem Namen der analysierten Datei einschließlich Pfadangabe. Danach wird die Zahl der Ballen, die aus der Datei herausgelesen und berechnet werden konnten, ausgegeben. Zusätzlich erfolgt noch ein Hinweis auf die geschriebene detaillierte Log-Datei.

Die anschließende fortlaufende Auflistung enthält alle identifizierten Arbeits-/Prozebelemente in der Reihenfolge ihres Auftretens. Die einzelnen Elemente sind mit folgenden Angaben festgehalten:

Analysierte Datei: C:\rb-dat95\29jun95\out502.imm
 25 Ballen gezählt und berechnet
 (Detailliertes Log-File C:\RB-DAT95\29JUN95\OUT502.STK geschrieben)

Ermittelte Arbeitselemente

0		Auswertungs-Anfang	[0]	[0 00]	[0 02]
1		Fahrt von Hofstelle zum Schlag	[1]	[0 02]	[6 18]
2		Gutaufnahme	[372]	[6 20]	[0 85]
3		Binden / Ballen auswerfen	[423]	[7 05]	[1 53]
4		Unterbrechung	[515]	[8 58]	[0 78]
5		Binden / Ballen auswerfen	[562]	[9 37]	[0 23]
6		Gutaufnahme	[576]	[9 60]	[0 53]
7		Wenden / Leerfahrten	[608]	[10 13]	[0 43]
8		Gutaufnahme	[634]	[10 57]	[0 38]
9		Binden / Ballen auswerfen	[657]	[10 95]	[1 62]
10		Gutaufnahme	[754]	[12 57]	[1 03]
11		Binden / Ballen auswerfen	[816]	[13 60]	[1 93]
12		Gutaufnahme	[932]	[15 53]	[0 10]
13		Wenden / Leerfahrten	[938]	[15 63]	[0 10]
14		Gutaufnahme	[944]	[15 73]	[1 02]
15		Binden / Ballen auswerfen	[1085]	[16 75]	[1 48]
16		Gutaufnahme	[1094]	[18 23]	[0 37]
17		Wenden / Leerfahrten	[1116]	[18 60]	[0 37]
18		Gutaufnahme	[1138]	[18 97]	[0 82]
19		Binden / Ballen auswerfen	[1187]	[19 78]	[1 37]
20		Gutaufnahme	[1269]	[21 15]	[0 60]
21		Wenden / Leerfahrten	[1305]	[21 75]	[0 47]
22		Gutaufnahme	[1333]	[22 22]	[0 58]
23		Binden / Ballen auswerfen	[1368]	[22 80]	[1 55]
24		Gutaufnahme	[1461]	[24 35]	[0 80]
25		Wenden / Leerfahrten	[1509]	[25 15]	[0 37]
26		Gutaufnahme	[1531]	[25 52]	[0 20]
27		Binden / Ballen auswerfen	[1543]	[25 72]	[1 35]
28		Gutaufnahme	[1624]	[27 07]	[1 07]
29		Binden / Ballen auswerfen	[1688]	[28 13]	[1 45]
30		Gutaufnahme	[1775]	[29 58]	[0 18]
31		Wenden / Leerfahrten	[1786]	[29 77]	[0 33]

Abbildung 37: Tabellarische Ergebnisausgabe ("Log-Datei") durch SATAZA.

- Zeilennummer in der Log-Datei.
- Elementname,
- Nummer der Datenzeile in der Ausgangsdatei, mit der das Element begann,
- Fortschrittszeit in Minuten (und Zentiminuten),
- Dauer, ebenfalls in Minuten, für das jeweilige Element.

Das zweite Fenster mit tabellarischer Ausgabe enthält die "Ergebnis-Datei" (Abb. 38).

Nach dem Datum und Namen der Meßwertdatei werden zuerst Beginn, Ende und Dauer des erfaßten Arbeitsablaufes angegeben. Anschließend folgen die Summenwerte für die Dauer, den zurückgelegten Weg und die durchschnittliche Geschwindigkeit bei den verzeichneten Arbeits-/Prozeßelementen. Diese Größen werden auch individuell für jeden einzelnen Ballen angegeben (in der Abbildung nicht enthalten).

Die beiden dargestellten und erläuterten tabellarischen Ausgaben stellen das Ergebnis der Zeiterfassung dar. Sie sind für den Arbeitswissenschaftler oder den Landwirt vorgesehen.

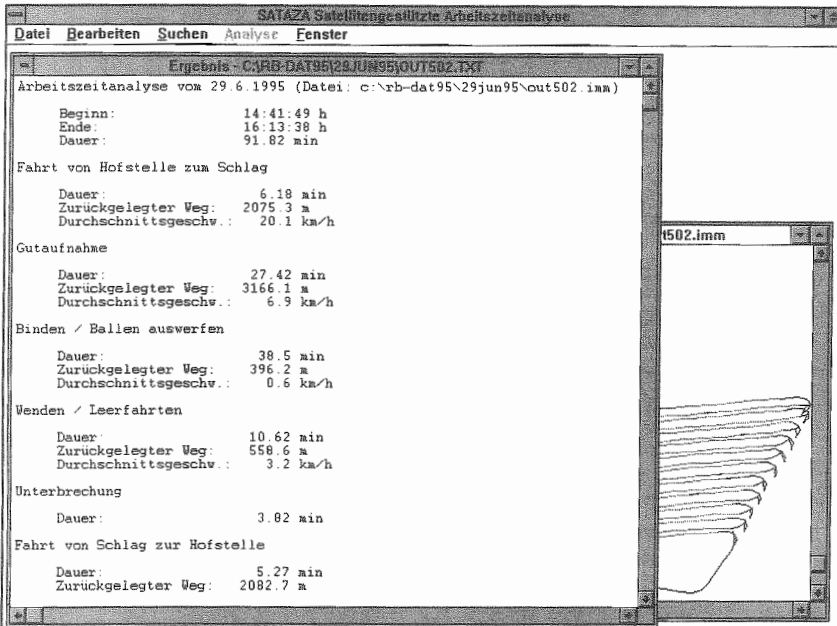


Abbildung 38: Tabellarische Ergebnisausgabe ("Ergebnis-Datei") durch SATAZA.

Die dritte Ausgabedatei ("out502.stk") ist in erster Linie für den Programmentwickler gedacht, der auf Basis dieser Auflistung Verbesserungen oder Erweiterungen im Analyseprogramm vornehmen kann. Sie ist eine Verbindung der beiden ersten Dateien mit zusätzlichen Informationen, wobei der einzelne Ballen im Vordergrund steht (Abb. 39).

Den Anfang bilden die ermittelten Arbeits-/Prozeßelemente, die mit den bereits von der Log-Datei her bekannten Größen (Zeilennummer in Ausgangsdatei, Fortschrittszeit und Dauer) dargestellt sind. Im Anschluß folgen der Zeitbedarf, der zurückgelegte Weg und die Durchschnittsgeschwindigkeit für den gesamten Ballen und für die einzelnen Elemente.

Zur Weiterverwendung können die Ergebnisse ausgedruckt, im ASCII-Format in eine Datei abgespeichert oder über die implementierte Schnittstelle an *LISL* weitergegeben werden.

The screenshot shows the SATAZA software window titled "SATAZA Satellitengestützte Arbeitszeitanalyse". The main window contains a text editor with the following content:

```

Ballen 1
[ 0] ..... Gutaufnahme: [ 576] [ 9.60] [ 0.53]
[ 1] ..... Wenden / Leerfahrten: [ 608] [10.13] [ 0.43]
[ 2] ..... Gutaufnahme: [ 634] [10.57] [ 0.38]
[ 3] ..... Binden / Ballen auswerfen: [ 657] [10.95] [ 1.62]
[ 4] ..... Ende: [ 754] [12.57]

Ballen 1 berechnet
Ballen Nr.: 1
Dauer: 2.97 min
Zurückgelegter Weg: 152.5 m
Durchschnittsgeschw.: 3.1 km/h

Gutaufnahme
Dauer: 0.92 min
Zurückgelegter Weg: 107.3 m
Durchschnittsgeschw.: 7.0 km/h

Binden / Ballen auswerfen
Dauer: 1.62 min
Zurückgelegter Weg: 9.6 m
Durchschnittsgeschw.: 0.4 km/h

Wenden / Leerfahrten
Dauer: 0.43 min
Zurückgelegter Weg: 35.6 m
Durchschnittsgeschw.: 4.9 km/h

Unterbrechung
Nicht vorhanden

Ballen 2
[ 0] ..... Gutaufnahme: [ 754] [12.57] [ 1.03]

```

Abbildung 39: Tabellarische Ergebnisausgabe ("Ballenspezifische Datei") durch SATAZA.

Manuelle Analyse

Da momentan nicht alle bei einem Arbeitsablauf auftretenden, analyserelevanten Vorgänge berücksichtigt werden können, hat der Benutzer die Möglichkeit, die Ergebnisse der automatisierten Analyse mit Hilfe eines weiteren Programmoduls zu überprüfen oder selbst eine manuelle, von SATAZA unterstützte Auswertung durchzuführen. Dieses Modul dient auch dem Entwickler für Verbesserungen am Programm.

Für die manuelle Auswertung wird der spezielle "Viewer" aus dem Menü "Analyse" aufgerufen. Dieser zeigt die Meßwertedatei in einer bereits modifizierten Form und die zur Verfügung stehenden Werkzeuge (Abb. 40).

In der unteren Hälfte des Viewers sind die Datenzeilen zu sehen. Den Inhalt der einzelnen Spalten erklären die darüberliegenden Spaltenbeschriftungen. Bei "Rückwärtsfahrt" handelt es sich um einen Platzhalter, der später einmal belegt werden kann. Die Werte für die Umdrehungen der Zapfwelle sind noch in Rohform (40 Impulse entsprechen einer

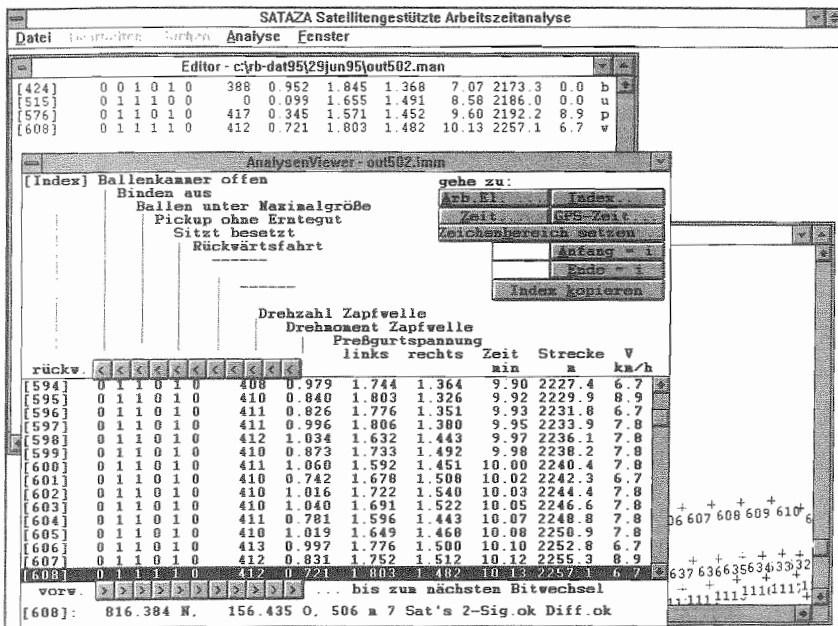


Abbildung 40: Analysen-Viewer von SATAZA.

Umdrehung der Zapfwelle pro Sekunde). Aufgeführt sind auch drei Meßgrößen (Drehmoment der Zapfwelle, Spannung der äußersten Pressgurte links und rechts), die für die Arbeitszeitanalyse nicht herangezogen werden. Die letzten drei Spalten zeigen die Fortschrittszeit in Minuten, die zurückgelegte Distanz in Meter (ermittelt aus den aufsummierten Impulsen der Reedschalter an den Felgen) und die Geschwindigkeit in km/h. Unterhalb des Datenfensters werden für die jeweils markierten Zeile (Inversdarstellung) noch zusätzliche Informationen dargestellt: die mit Hilfe des GPS ermittelte Position, die Anzahl der erfaßten Satelliten, die GPS-Statusmeldung, und ein expliziter Hinweis, falls die Position differenziell ermittelt wurde.

Mit den "<"-und ">"-Knöpfen direkt oberhalb und unterhalb des Datensichtfensters kann in einer Meßwertspalte vorwärts oder rückwärts der nächste Wertwechsel gesucht werden. Ist z.B. der Wert für die Gutaufnahme in der markierten Zeile "0", so wird durch Anklicken von ">" in der Datei vorgeblättert, bis die Zeile erscheint, in der der Wert für die Gutaufnahme nach "1" wechselt. Mit dem Befehl "Arb.El." erscheint die aus der Logdatei bekannte Auflistung der ermittelten Arbeitselemente. Wird aus dieser Liste ein Element angeklickt, so wird

in der Wertedatei soweit vor- bzw. zurückgeblättert, bis im Datensichtfenster die Zeile erscheint, mit der dieses Arbeits-/Prozebelement beginnt. Mit dem Schalter "Index..." kann eine Zeile mit einer bestimmten Nummer angesprungen werden, mit "Zeit" die Zeile mit einer bestimmten Fortschrittszeit und mit dem Schalter "GPS-Zeit..." die Zeile mit einer ausgewählten Zeit, die vom GPS-Empfänger ausgegeben wurde. Zur auszugsweisen graphischen Darstellung des Schlepperweges im Fahrwegfenster dient der Befehl "Zeichenbereich setzen...", wobei die Anfangszeilennummer mit "Anfang = i" und die Endzeilennummer mit "Ende = j" gesetzt wird.

Mit dem letzten Befehlsschalter "Index kopieren" kann eine markierte Datenzeile komplett in ein Texteditorfeld kopiert werden. Der Benutzer verwendet diese Funktion zur manuellen Analyse und erstellt damit eine Datei, die von jedem Arbeits-/Prozebelement die erste Datenzeile enthält. In Abbildung 40 ist bereits eine derartige Datei ("out502.man") angelegt worden; den Abschluß jeder Zeile bildet der vom Benutzer eingegebene Kennbuchstabe für das Element. Diese Datei wird schließlich an *Excel* weitergegeben, wo die einzelnen Summenwerte und die Zeiten für die Arbeitsarten errechnet werden.

Mit Hilfe der Datenzeilennummern im Datenfenster und in der graphischen Darstellung des Fahrweges (siehe Abb. 40) kann problemlos zu jeder Datenzeile der entsprechende Fahrwegabschnitt gefunden werden und umgekehrt. Dadurch wird eine einfache und sichere manuelle Analyse möglich.

Bei der manuellen Analyse greift der Benutzer das Ergebnis der automatischen Auswertung als Vorschlag auf und überprüft, inwieweit Fehler vorhanden oder Verbesserungen erforderlich sind. Für seine Auswertungen zieht er weitere Informationen heran, die bei der automatischen Analyse unberücksichtigt bleiben. Dazu zählen vor allem die Fahrzeugposition, die Kenntnis des Gesamtarbeitsablaufes und die Lage eines Zeitelements im Gesamttablauf. Der Benutzer kann damit übersehene Arbeitselemente identifizieren und falsch deklarierte Elemente berichtigen.

Einflußgrößen lassen sich bei der manuellen Analyse detailliert bestimmen. Schlagentfernung, Schlaglänge bzw. Schwadlänge, Fahrgeschwindigkeit und Rüsten sind mit den Angaben im Analyse-Viewer ermittelbar. Schlag-, Arbeits- und Wendeform können vom Fahrweg in der graphischen Darstellung abgeleitet werden. Da Distanzmessungen und Flächenberechnungen im Fahrwegfenster noch nicht realisiert sind, wird zur weiteren Einflußgrößenanalyse durch Auswahl des entsprechenden Programmeneintrags der Fahrweg in eine Datei abgespeichert

("AutoCad-Scriptdatei"), die in *AutoCad* eingelesen werden kann. Dort lassen sich die wirk-same Arbeitsbreite und die Schlaggröße ermitteln. Die Schlaggröße ergibt sich auf Basis der äußersten, schlaggrenzennächsten Schwade: Unter zusätzlicher Berücksichtigung der Arbeitsbreite kann eine Schlagumhüllende (Polygonzug) gezeichnet werden, deren Fläche von *Auto-Cad* errechnet wird.

Die manuellen Analysen wurden von einer Person durchgeführt, die gute Kenntnisse über den Einsatz von Rundballenpressen und den allgemeinen Arbeitsablauf hat, bei den Versuchsein-sätzen auf dem Feld, die ausgewertet wurden, nicht dabei war und keinen Zugriff auf die manuell ermittelten Zeitangaben und Meßprotokolle hatte. Damit wurde verhindert, daß durch unzulässige Vorkenntnisse des Analytikers über den auszuwertenden Feldeinsatz die Bewertung der manuellen Auswertung verfälscht werden könnte. Für die Einübung und Ent-wicklung von Regeln und Ablaufkennmustern zur Identifizierung von Arbeits-/Prozeß-elementen bekam der Analytiker die Datensätze zweier aufgezeichneter Einsätze und die dazugehörigen manuell ermittelten Zeitangaben und Meßprotokolle.

5.3 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden exemplarisch für einen Einsatz der Rundballenpresse die Ergebnisse der Arbeitszeitanalyse aufgeführt. Dabei handelte es sich um das Pressen von Wiesenheu auf einer Fläche von 1,5 ha ("Grafwiese") am 29.6.1995. Der Vergleich der Resultate mit den handgestoppten Zeiten und den Distanzen, die mit dem Bandmaß ermittelt wurden, soll die erzielbare Genauigkeit der automatisierten Erfassung und der Auswertung mit *SATAZA* aufzeigen. Desweiteren sollen auch die ermittelten Einflußgrößen auf die Arbeitszeitanalyse erläutert werden. Zunächst wird das Datenerfassungssystem analysiert.

5.3.1 Sensorik und Erfassungssystem

Bei dem Versuch auf der Grafwiese erwies sich das Erfassungssystem und die Sensorik als sehr robust, es kam zu keinerlei technisch bedingten Ausfällen. Dieses Resultat wurde auch durch weitere Einsätze auf weit mehr als 50 ha bestätigt.

Die Eignung des GPS zur Positionsermittlung, als eine Anforderung an das System zur automatisierten Zeiterfassung, wurde bereits ausführlich erläutert. Die mit den beiden GPS-

Empfängern ermittelten Fahrwege sind in den Abbildungen 27 und 28 bzw. 36 dargestellt. Die zweite Anforderung, die Ausgabe der Uhrzeit, wurde von beiden GPS-Empfängern immer voll erfüllt. Ausfälle traten nicht auf.

Bei einigen Sensoren bzw. Sensorapplikationen zeigte sich, daß die Meßgröße nicht immer erfaßt werden konnte. So kam es bei der Reflexionslichtschranke an der Pick-up zu verschmutzungsbedingten Störungen. Durch Schmutzablagerungen auf dem Reflektor auf der Pick-up wurde häufig der Reflexionsgrad so stark verringert, daß nicht mehr genügend Licht reflektiert und fälschlicherweise Gutaufnahme angezeigt wurde. Der Gutstrom bewirkte zwar eine gewisse Reinigung des Reflektors, aber längerandauernde Fehlmessungen - z.T. über mehrere Minuten hinweg und mehrmals pro Betriebsstunde - sprechen gegen den Einsatz dieser Sensorapplikation für die automatisierte Arbeitszeiterfassung.

Auch bei der Einweglichtschranke auf der Oberseite der Pick-up traten größere Störungen auf. Durch Ablagerungen von Schmutz oder Erntegut auf der Sende- oder Empfängereinheit wurden die Messungen beeinträchtigt. Die Verlegung der Lichtschranke mit Hilfe der Verlängerungsarme vor die Pick-up konnte dieses Problem weitgehend lösen. Störungen kamen nur noch selten vor. Deshalb wurden die Daten dieses Sensors zur Erkennung der Gutaufnahme herangezogen.

Erwartungsgemäß traten bei den Sensoren, die zur serienmäßigen Ausrüstung der Presse gehören, keine Störungen auf. Der Bindevorgang, die Ballenübergröße und der Zustand der Preßkammer wurden immer korrekt ermittelt.

Die Reedschalter zur Ermittlung der Radumdrehungen erwiesen sich als gute Basis zur Feststellung der zurückgelegten Strecke. Bei der Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit traten geringe Abweichungen auf: Es kam zu einer Impulsauslösung aufgrund von Fahrzeugschütterungen trotz Fahrzeugstillstand, weil sich ein Magnet in einer bestimmten Lage relativ nah zum Reedschalter befand.

Die Leistungsmeßnabe zur Ermittlung der Zapfwellendrehzahl und der Sitzkontaktschalter funktionierten fehlerfrei. Ebenso problemlos arbeiteten die Datalogger und der Aufzeichnungs-PC. Alle von den Sensoren ermittelten Meßwerte wurden erfaßt und abgespeichert. Dieser Vorgang lief vollautomatisiert ab. Mit den erfaßten Daten konnte dann die manuelle und automatisierte Analyse der Arbeitszeit durchgeführt werden.

5.3.2 Manuelle Analyse mit SATAZA

Die Ergebnisse der manuellen Analyse mit *SATAZA* und der anschließenden Zusammenfassung nach Arbeitsarten und Gesamtzeit in *Excel* werden als formatierte Tabelle ausgegeben (Tab 15).

Tabelle 15: Mit *SATAZA* (manuelle Analyse) ermittelte Arbeitszeiten für den Einsatz der Rundballenpresse auf der Grafwiese am 29.6.1995.

Analysenebene	Ab-schnitte							
1	Gesamtzeit	Gesamtzeit 91,77 min						
2	Arbeitsarten	Tätigkeitszeit 87,72 min				Unterbrechungszeit 4,05 min		
		Hauptzeit 66,99 min	Nebenzeit 7,61 min	Rüstzeit 3,24 min	Wegezeit 9,88 min	technisch ---	organisat. ---	persönlich ---
3	Arbeits-/Prozeß-elemente	Pressen (Gutaufnahme)	27,42 min		Unterbrechung 4,05 min			
		Binden	39,57 min					
		Wenden/Leerfahrten	7,61 min					
		Netzrolle/Garn nachfüllen	--- min					
		Vorbereitung Pressen	1,00 min					
		Vorbereitung Straßenfahrt	2,24 min					
		Fahrt Hof - Schlag	5,00 min					
Fahrt Schlag - Hof	4,88 min							

Die Resultate sind in drei Analyseebenen hierarchisch gegliedert, wobei die Werte von Ebene 3, der Elementebene, aus *SATAZA* hervorgehen, die beiden darüberliegenden von den Berechnungen in *Excel* stammen. Die Tabelle enthält somit detaillierte und aggregierte Zeitangaben.

Ein Vergleich mit den Zeitwerten, die auf den Stoppuhrmessungen basieren, zeigt die Genauigkeit der automatisierten Erfassung und der manuellen Arbeitszeitanalyse mit *SATAZA* (Tab. 16).

Bei der Gesamt-, der Tätigkeits- und der Unterbrechungszeit betragen die Unterschiede nur wenige Zentiminuten. Ebenso niedrig sind die relativen Unterschiede. In Relation zur Gesamtzeit verschwinden die Differenzen fast vollständig. Bei den anderen Zeiten sind die Abweichungen z.T. größer. Sie liegen mit Ausnahme eines Wertes in einem Bereich von ca. ± 2 %, in Relation zur Gesamtzeit verringern sie sich auf etwa $\pm 0,5$ %. Die höchste relative

Tabelle 16: Differenzen zwischen den Ergebnissen der manuellen Analyse mit *SATAZA* und den Referenzzeiten (Grafwiese, 29.6.1995).

Abschnitte	Mit Stoppuhr ermittelt (min)	Anteil an Gesamtzeit (%)	Mit <i>SATAZA</i> manuell ermittelt (min)	Differenz		Differenz als Anteil an Gesamtzeit (%)
				abs. (min)	rel. (%)	
Gesamtzeit	91,81	100,0	91,77	-0,04	0,0	0,0
Tätigkeitszeit	87,79	95,6	87,72	-0,07	-0,1	-0,1
Unterbrechungszeit	4,02	4,4	4,05	0,03	0,7	0,0
Hauptzeit	66,84	72,8	66,99	0,15	0,2	0,2
Nebenzeit	7,77	8,5	7,61	-0,16	-2,1	-0,2
Rüstzeit	3,24	3,5	3,24	0,00	0,0	0,0
Wegezeit	9,94	10,8	9,88	-0,06	-0,6	-0,1
Zeit für Gutaufnahme	26,84	29,2	27,42	0,58	2,2	0,6
Zeit für Binden	40,00	43,6	39,57	-0,43	-1,1	-0,5
Zeit für Wenden/Leerfahrten	7,77	8,5	7,61	-0,16	-2,1	-0,2
Zeit für Netzrolle/Garn nachfüllen	0,00	0,0	---	---	---	---
Zeit für Vorber. zum Pressen	1,04	1,1	1,00	-0,04	-3,8	0,0
Zeit für Vorber. zur Straßenfahrt	2,20	2,4	2,24	0,04	1,8	0,0
Zeit für Fahrt Hof - Feld	5,01	5,5	5,00	-0,01	-0,2	0,0
Zeit für Fahrt Feld - Hof	4,93	5,4	4,88	-0,05	-1,0	-0,1

Angabe (-3,8 %) hat ihre Ursache in einem niedrigen absoluten Bezugswert. Die größeren Unterschiede sind vor allem bei den Zeiten für die Arbeits-/Prozeßelemente zu verzeichnen, ihr Zustandekommen zeigt sich bei einer Überprüfung der Werte für die einzelnen Ballen. In Abbildung 41 sind für alle Ballen die Abweichungen bei der Gutaufnahme dargestellt.

Abgesehen von zwei Differenzwerten liegen alle Abweichungen bei den Zeiten für die Gutaufnahme im positiven Bereich, d.h., daß *SATAZA* den Zeitaufwand überschätzt. Der durchschnittliche Fehler beträgt 2,3 cmin, die Standardabweichung beläuft sich auf 2,70 cmin. Der mittlere relative Abweichungswert fällt mit 2,2 % etwas groß aus, da die absoluten Zeitwerte, auf die sich die relativen Abweichungen beziehen, nicht allzu hoch sind.

Beim Binden liegen die Abweichungen überwiegend im negativen Bereich (Abb. 42).

Im Mittel beträgt der Unterschied zwischen den mit der Stoppuhr ermittelten Werten und den Ergebnissen, die mit *SATAZA* berechnet wurden, -1,7 cmin. Die absoluten Abweichungen erstrecken sich von -8 bis 3 cmin mit einer Standardabweichung von 2,49 cmin. Der mittlere relative Abweichungswert liegt bei -1,1 %.

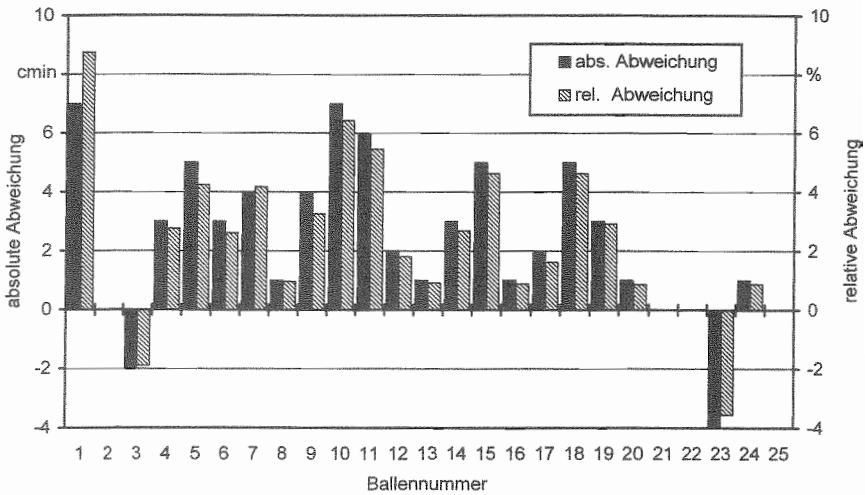


Abbildung 41: Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten bei der Gutaufnahme (manuelle Analyse mit SATAZA, Grafwiese, 29.6.1995).

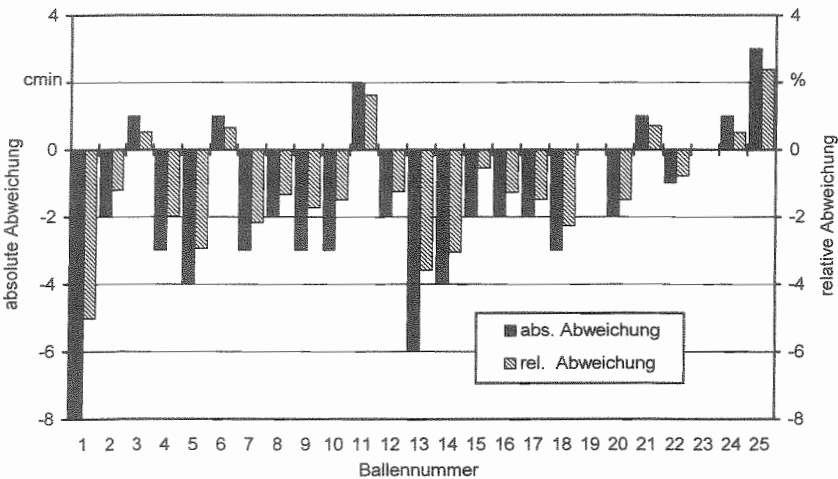


Abbildung 42: Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Binden (manuelle Analyse mit SATAZA, Grafwiese, 29.6.1995).

Auch beim Wenden weisen die meisten Abweichungswerte ein negatives Vorzeichen auf (Abb. 43).

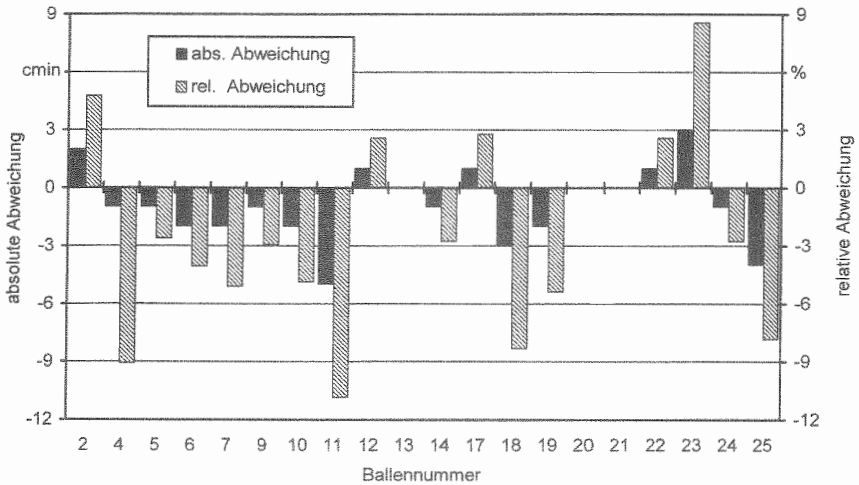


Abbildung 43: Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Wenden (manuelle Analyse mit SATAZA, Grafwiese, 29.6.1995).

Da nicht bei allen Ballen ein Wendevorgang auftrat, sind in der Abbildung nur 20 der 25 Ballen aufgezeigt. Die absoluten Abweichungen fallen hier niedriger aus als bei den ersten beiden Arbeits-/Prozesselementen. Mit Ausnahme von zwei Werten liegen die Abweichungen in einem Bereich von ± 3 cmin. Der Mittelwert beläuft sich auf -0,9 cmin, die Standardabweichung beträgt 1,95 cmin. Da die mittlere Wendezeit nur bei 37 cmin liegt, führen die geringen absoluten Abweichungen zu hohen relativen Differenzwerten: sie reichen von -11 bis ca. 8 %, wobei der durchschnittliche Unterschied -2,3 % beträgt.

5.3.3 Automatisierte Analyse mit SATAZA

Die Ausgabe der Resultate der automatisierten Analyse erfolgt in der Form, die in Kapitel 5.2.7 vorgestellt wurde. Zusätzlich werden die Ergebnisse auch mit dem von der manuellen Analyse her bekannten *Excel*-Arbeitsblatt vorgelegt. Die Arbeitszeitwerte vom Einsatz der Rundballenpresse auf der Grafwiese sind in Tabelle 17 zu sehen.

Tabelle 17: Differenzen zwischen den Ergebnissen der automatisierten Analyse mit *SATAZA* und den Referenzzeiten (Grafwiese, 29.6.1995).

Abschnitte	Mit Stoppuhr ermittelt (min)	Anteil an Gesamtzeit (%)	Mit <i>SATAZA</i> automatisiert ermittelt (min)	Differenz		Differenz als Anteil an Gesamtzeit (%)
				abs. (min)	rel. (%)	
Gesamtzeit	91,81	100,0	91,83	0,02	0,0	0,0
Tätigkeitszeit	87,79	95,6	88,01	0,22	0,3	0,2
Unterbrechungszeit	4,02	4,4	3,82	-0,20	-5,0	-0,2
Hauptzeit	66,84	72,8	65,94	-0,90	-1,3	-1,0
Nebenzeit	7,77	8,5	10,62	2,85	36,7	3,1
Rüstzeit	3,24	3,5	---	---	---	---
Wegezeit	9,94	10,8	11,45	1,51	15,2	1,6
Zeit für Gutaufnahme	26,84	29,2	27,43	0,59	2,2	0,6
Zeit für Binden	40,00	43,6	38,51	-1,49	-3,7	-1,6
Zeit für Wenden/Leerfahrten	7,77	8,5	10,62	2,85	36,7	3,1
Zeit für Netzrolle/Garn nachfüllen	0,00	0,0	---	---	---	---
Zeit für Vorber. zum Pressen	1,04	1,1	---	---	---	---
Zeit für Vorber. zur Straßenfahrt	2,20	2,4	---	---	---	---
Zeit für Fahrt Hof - Feld	5,01	5,5	6,18	1,17	23,4	1,3
Zeit für Fahrt Feld - Hof	4,93	5,4	5,27	0,34	6,9	0,4

Die Unterschiede zwischen den Referenzzeiten auf Basis der Stoppuhr und den Ergebnissen der automatisierten Analyse mit *SATAZA* sind überwiegend höher als die Differenzen, die bei der manuellen Analyse mit *SATAZA* zustande kamen. Während bei der Gesamt- und bei der Tätigkeitszeit die Abweichungen noch gering sind, betragen sie für die Unterbrechungszeit bereits -5 %. Die drei Unterbrechungen, die beim Einsatz auf der Grafwiese auftraten, wurden von *SATAZA* erkannt. Der Großteil der Differenz zwischen den Summenwerten von *SATAZA* und der Stoppuhr geht auf die Abweichung bei der ersten Unterbrechung zurück. Während bei der zweiten und dritten Unterbrechung die Differenzen sich auf -4 cmin und 4 cmin beliefen, waren es bei der dritten -20 cmin.

Der größte Unterschied ist mit annähernd 37 % für die Nebenzeit bzw. für das Element Wenden/Leerfahrten zu verzeichnen. In Relation zur Gesamtzeit sind es ca. 3 %.

Die automatisiert ermittelte Wegezeit fällt um 15 % höher aus. Die Hinfahrt liegt mit 6,18 min um 1,17 min (23,4 %) über dem Zeitwert der Stoppuhr. In der automatisiert ermittelten Hinfahrt ist aber das Rüsten (1,04 min) und die Leerfahrt vom Rüstort zum

Schwadanfang (0,16 min) aufgrund der getroffenen Vorgaben enthalten. Werden diese Zeiten von den 6,18 min abgezogen, so beträgt der Unterschied noch -3 cmin bzw. -0,5 %. Bei der Rückfahrt beläuft sich die Differenz auf 34 cmin (6,9 %). Wird sie um das Rüsten korrigiert, so liegt der neue Unterschiedswert bei -1,86 min bzw. -37,7 %. Wird die Gesamtwegezeit um die Rüstzeit verkürzt, so ergibt sich eine Differenz von etwa -17 %.

Der Differenzwert für die Gutaufnahme bei der automatischen Auswertung ist mit 2,2 % genau so hoch wie bei der manuellen Analyse.

Bei der Überprüfung der Differenzen bei den einzelnen Ballen zeigen sich die gleichen Tendenzen wie bei den Ergebnissen der manuellen Analyse. Für die Gutaufnahme liegen nahezu alle Zeitabweichungswerte wiederum im positiven Bereich (Abb. 44).

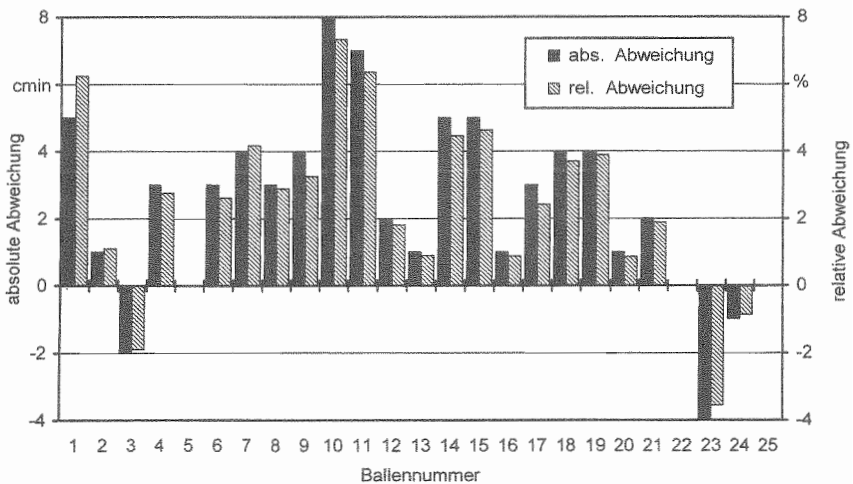


Abbildung 44: Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten bei der Gutaufnahme (automatisierte Analyse mit SATAZA, Grafwiese, 29.6.1995).

Die Differenzen reichen von -4 bis 8 cmin, der Durchschnittswert beträgt 2,4 cmin ($\sigma = 2,75$ cmin). Diese Resultate sind nahezu identisch mit den Ergebnissen der manuellen Analyse.

Ähnlich wie bei den Ergebnissen der manuellen Analyse fallen beim Vergleich mit den Referenzwerten die automatisch ermittelten Zeiten für das Binden niedriger aus (Abb. 45).

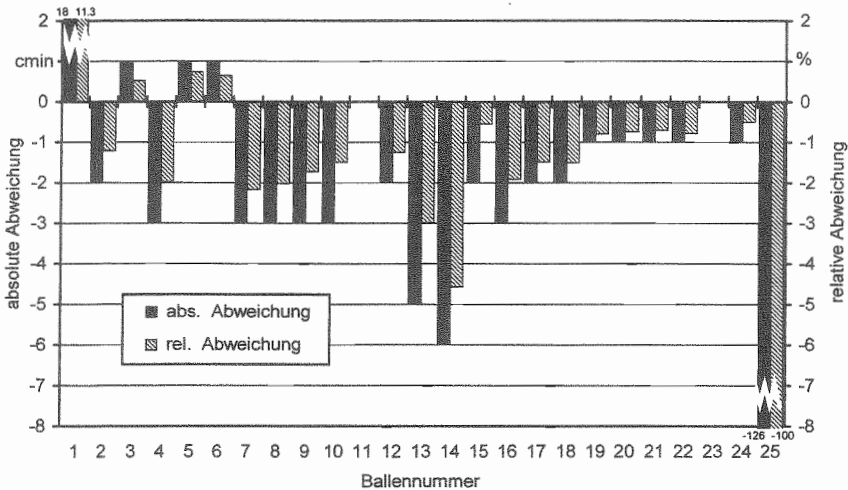


Abbildung 45: Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Binden (automatisierte Analyse mit SATAZA, Grafwiese, 29.6.1995).

Auffallend sind aufgrund ihrer hohen Beträge die Differenzwerte für den ersten und letzten Ballen: 18 cmin und -126 cmin. Da beim letzten Ballen die Abweichung 100 % beträgt, bedeutet dies, daß kein Binden festgestellt werden konnte. Diese großen absoluten und relativen Differenzen wirken sich entsprechend auf die Mittelwerte aus. Sie belaufen sich auf -6,0 cmin bzw. -4,6 % bei einer Standardabweichung von 25,38 cmin für die absoluten Abweichungen. Wird der letzte Ballen bei der Kennzahlenermittlung ausgeklammert, so führen die Neuberechnungen zu mittleren Abweichungswerten von -1,0 cmin ($s = 4,40$ cmin) und -0,6 %.

Auch bei den Differenzzeiten für das Element Wenden fällt der Wert des letzten Ballens wieder auf (Abb. 46).

Beim Ballen 25 beträgt die absolute Abweichung 312 cmin, die relative mehr als 600 %. Die Differenzen bei den anderen Ballen fallen deutlich niedriger aus. Sie liegen in einem Bereich -4 bis 3 cmin. Die durchschnittlichen Abweichungswerte betragen 15,0 cmin ($s = 69,9$ cmin) oder 28,9 %. Bei einer Berechnung der Mittel ohne den letzten Ballen ergeben sich Durchschnittswerte von -0,6 cmin ($s = 1,8$ cmin) und -1,8 %. Diese neuen Kennzahlen sind mit denen der manuellen Analyse nahezu identisch.

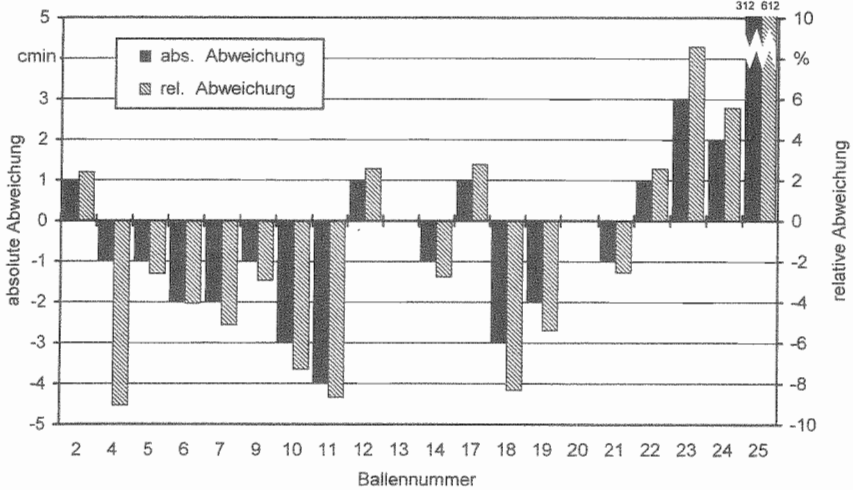


Abbildung 46: Absolute und relative Abweichungen der ermittelten Zeiten von den Referenzwerten beim Wenden (automatisierte Analyse mit *SATAZA*, Grafwiese, 29.6.1995).

5.3.4 Einflußgrößen auf die Arbeitszeit

Anhand der graphischen Fahrwegsdarstellung durch *SATAZA* (siehe Abb. 36 bzw. 28) konnten die ersten Einflußgrößen auf die Arbeitszeit bestimmt werden. Aus den Darstellungen ist ersichtlich, daß die Grafwiese einen trapezförmigen Grundriß aufweist. Vom Schlepperfahrer wurde als Arbeitsform die Auf-Ab-Bearbeitung gewählt, gewendet wurde durch Zurückstoßen.

Ein Vergleich mit Abbildung 27 zeigt, daß eine ungenauere Positionsermittlung die Bestimmung der Einflußgrößen erschwert. Deshalb erfolgte die Analyse in *SATAZA* mit den Positionsdaten, die der ASHTECH-Empfänger ermittelte. Dazu wurden die in den automatisiert erfaßten Arbeitszeitdaten enthaltenen Positionswerte (festgestellt durch das Gerät von *FURUNO*) durch die Koordinaten, die vom ASHTECH-Empfänger herrühren, ausgetauscht. Weil die ASHTECH-Anlage nur alle 2 s die ermittelte Position ausgab, wurde für eine Koordinatenausgabe im Abstand von einer Sekunde die fehlenden Werte durch eine einfache Mittelwertbildung aus der vorausgehenden und der nachfolgenden Position errechnet.

Für die Schlagentfernung errechnete *SATAZA* bei der Hinfahrt 2075,3 m, bei der Rückfahrt 2082,7 m (siehe Abb. 38). Diese beiden Werte differieren, da auf der Wiese Ankunfts- und Abfahrtsort unterschiedlich waren. Weitere Distanzwerte, die für einzelne Arbeitsabschnitte ermittelt wurden, sind in Abbildung 38 zu sehen.

Zur Beurteilung der Genauigkeit der Distanzmessung erfolgte eine Bestimmung der Länge der 21 Schwade auf der Grafwiese. Mit Hilfe des *AnalysenViewers* und der Fahrweggraphik wurden die Anfangs- und Endpunkte der Schwade ermittelt und die Längen, basierend auf der Radumdrehungszählung mit den Reedschaltern und den Koordinaten des ASHTECH-Empfängers errechnet. Die Abweichungen zu den Referenzwerten zeigt Abbildung 47.

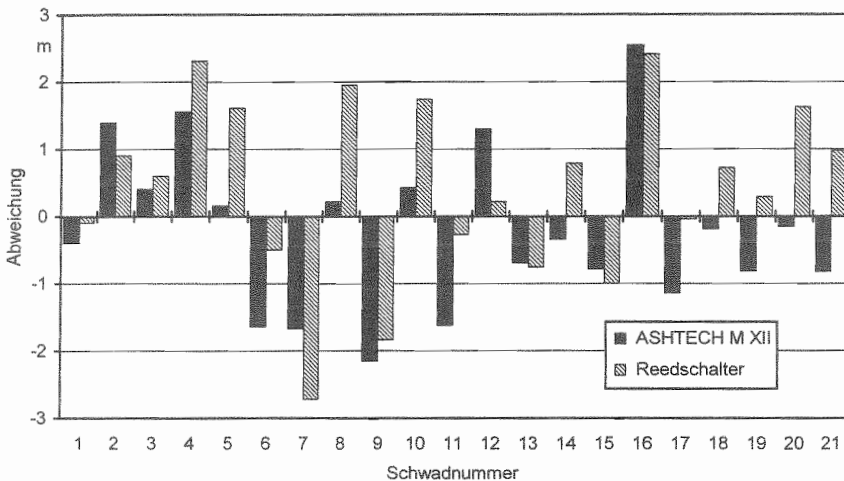


Abbildung 47: Abweichungen der ermittelten Schwadlängen von den Referenzwerten bei der Schwadlängenmessung mit ASHTECH M XII und Radumdrehungszählung mit Reedschalter (Grafwiese, 29.6.1995).

Die Referenzmessungen ergaben Schwadlängen von 169 m (Schwad 1) bis 128 m (Schwad 21). Bei beiden Verfahren der Schwadlängenmessung liegen die Abweichungen zu den tatsächlichen Werten in einem Bereich von ca. $\pm 2,5$ m absolut, bzw. $\pm 1,8$ % relativ. Bei den Längen auf Basis der Angaben des ASHTECH-Empfängers beläuft sich die durchschnittliche Abweichung auf -0,2 m (-0,2 %), die Standardabweichung liegt bei 1,20 m. Das Streckenmeßverfahren mit den Reedschaltern weist einen mittleren Fehler von 0,4 m (0,3 %) auf, die Standardabweichung hat einen Wert von 1,33 m.

Die von *SATAZA* für die einzelnen Arbeitsabschnitte (vgl. Abb. 38) ermittelten Fahrgeschwindigkeiten sind in Tabelle 18 im Überblick dargestellt.

Tabelle 18: Mit *SATAZA* ermittelte Geschwindigkeiten beim Rundballenpressen auf der Grafwiese am 29.6.1995.

Arbeitsabschnitt	Geschwindigkeit (km/h)
Fahrt von Hofstelle zum Schlag	20,1
Gutaufnahme	6,9
Binden/Ballen auswerfen	0,6
Wenden/Leerfahrten	3,2
Fahrt von Schlag zur Hofstelle	23,7

Für das Binden der Rundballen wurde die durchschnittliche Geschwindigkeit ermittelt, da während dieses Vorgangs die Presse zurückgesetzt und später wieder an den Schwad herangefahren wurde. Der Wert für das Wenden ist im Vergleich zur Gutaufnahme nur etwa halb so groß, weil aufgrund der gewählten Wendeform das Fahrzeug pro Wendevorgang zweimal kurz zum Stillstand kam.

AutoCad ermittelte für die Grafwiese eine Größe von 1,48 ha, vom Grundstückseigentümer wurden 1,5 ha angegeben. Die computergestützte Bestimmung konnte nicht direkt durchgeführt werden, da zuerst eine Bestimmung der Schlaggrenzen ("Schlagumhüllende") auf Basis der festgestellten Schwadverläufe am Wiesenrand erforderlich war. Deshalb wurden die mit dem Bandmaß ermittelten Abstände zwischen den äußersten Schwaden und den Schlaggrenzen in die Schwadverlaufszeichnung von *AutoCad* dargestellt, so daß schließlich ein schlagumhüllendes Polygon gezeichnet werden konnte. Seine Fläche bzw. die Schlaggröße berechnete *AutoCad* automatisch.

Weitere Einflußgrößen auf die Arbeitszeit wurden nicht mehr mit *SATAZA* bestimmt. Die wirksame Arbeitsbreite, die Ertragshöhe (Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeit) und die Ballengröße bzw. das Ballengewicht soll im Zuge der Ertragsermittlung festgestellt werden.

5.4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, daß mit dem aufgebauten Erfassungssystem und mit dem Programm *SATAZA* eine automatisierte Arbeitszeiterfassung durchführbar ist, die überwiegend ähnlich genaue Resultate bringt wie die Handmessung. Ein Zeitnehmer auf dem Feld ist somit nicht mehr erforderlich, der Aufwand zur Ermittlung der Arbeitszeit wird deutlich verringert.

5.4.1 Sensorik und Erfassungssystem

Der GPS-Empfänger ist für die automatisierte Zeitermittlung das zentrale Erfassungsgerät. Er stellt die Position und die Uhrzeit zur Verfügung. Die Eigenschaften und die Eignung des GPS wurden bereits im Kapitel über die Ortung (4.4) diskutiert. Die technische Tauglichkeit dieses Ortungssystems für ein automatisiertes Erfassungssystem haben auch die Resultate der Zeiterfassung bestätigt.

Ein Schlüsselsensor für die automatisierte Zeiterfassung ist der Meßwertgeber, der die Gutaufnahme feststellt. Dieser Sensor hat maßgeblichen Einfluß auf die Unterteilung der Arbeit auf dem Feld in Gutaufnahme, Binden und Wenden; er muß deshalb exakt und möglichst störungsfrei arbeiten. Von den getesteten Meßwertgebern brachte die Einweglichtschranke vor der Pick-up die besten Resultate. Für den Praxiseinsatz unter vielfältigsten Bedingungen muß dieser Sensor und dessen Applikation noch verbessert werden. Dazu zählt vor allem das Freihalten der optischen Teile der Lichtschranke von Erntegut und Schmutz.

Trotz der einfachen und relativ störungsunempfindlichen Funktionsweise der Reedschalter zur Wegmessung kann auf dieses Streckenmeßsystem verzichtet werden, da GPS, das ohnehin im automatisierten Erfassungssystem vorhanden ist, deren Aufgabe übernehmen kann.

Eine Leistungsmeßnabe ist zur einfachen Erfassung der Drehzahl der Zapfwelle ein zu aufwendiges und zu teures Meßgerät. Außerdem ist eine hochgenaue Zapfwellendrehzahlermittlung für die automatisierte Arbeitszeiterfassung nicht erforderlich. Die Drehzahlmessung könnte sehr viel einfacher und kostengünstiger durchgeführt werden, z.B. mit Hilfe von Reedschaltern oder über die Schlepperbordelektronik. Der Einsatz einer Leistungsmeßnabe ist nur gerechtfertigt, wenn tatsächlich die Antriebsleistung, z.B. für die Maschinensteuerung, ermittelt werden muß.

Auf den Sitzkontaktschalter kann nicht verzichtet werden. Er liefert das Hauptsignal zur Erkennung von Unterbrechungen. In modernen Schleppersitzen ist ein derartiger Sensor in der Regel bereits vorhanden, da dessen Signale zur Einstellung der Federung und der Dämpfung des Sitzes herangezogen werden. Dadurch ist die Ermittlung, ob der Fahrersitz besetzt ist, durch einen einfachen Signalabgriff zu realisieren.

Die Meßgrößenerfassung beruht somit fast ausschließlich auf bereits installierten Sensoren, die zur Standardausstattung zählen. Da davon ausgegangen werden kann, daß zukünftig auch ein GPS-Empfänger zur Standardausstattung eines Schleppers gehören wird, beschränkt sich die Sensorikergänzung auf einen Meßwertgeber zur Erkennung der Gutaufnahme.

Im Vergleich zu den bisher eingesetzten Erfassungssystemen für den Arbeitszeitaufwand stellt die eigene Entwicklung eine wesentliche Verbesserung und einen großen Schritt in Richtung einer vollständigen Automatisierung der Datenerfassung dar. Da der Schlepperfahrer nicht mehr in den Erfassungsprozeß eingreifen muß, werden Bedienfehler, wie sie BILLER 1985 [41] beschrieb, vermieden. Die im System von AUERNHAMMER und ROTTMEIER 1990 [32] noch notwendige manuelle Ermittlung und Aufzeichnung einzelner Größen, die den Arbeitsablauf beeinträchtigten, werden nun vom automatisierten Erfassungssystem übernommen. Somit werden weder die Bedienperson noch der Arbeitsablauf durch die Datenerfassung gestört.

5.4.2 Manuelle Arbeitszeitanalyse mit SATAZA

Die manuelle Arbeitszeitanalyse mit SATAZA wurde als Zwischenziel auf dem Weg zur vollständig automatisierten Auswertung den Anforderungen voll gerecht. Mit ihr ist eine relativ genaue Ermittlung detaillierter Arbeitszeiten möglich. Die erhobenen Daten können hinsichtlich ihrer Tauglichkeit für die automatisierte Analyse überprüft werden, und der Programmierer erhält eine wesentliche Hilfestellung bei der Entwicklung von Analysealgorithmen.

Die ermittelten Zeiten in Tabelle 16 zeigen, daß die automatisiert erfaßten Daten alle notwendigen Angaben enthalten, um aus ihnen die Dauer für die einzelnen Zeitabschnitte relativ genau bestimmen zu können. Die größeren Differenzen zwischen den Referenzzeiten, die mit der Stoppuhr ermittelt wurden, und den Ergebnissen der manuellen Analyse mit SATAZA, sind auf der Elementebene zu finden. In den darüberliegenden Ebenen gleichen sich

die Unterschiede durch einen zunehmenden Aggregierungsgrad der Zeiten aus, so daß bei der Gesamtzeit nur noch ein minimaler Unterschied verbleibt.

Die zeitlichen Differenzen haben ihre Ursache in erster Linie in der Erkennung der Gutaufnahme. Wie in Tabelle 16 zu sehen ist, handelt es sich bei dem Unterschied von 58 cmin bei der Gutaufnahme um den Betrag, der beim Binden (-43 cmin) und beim Wenden (-16 cmin) fehlt. Der Hauptgrund für die zu hohen Werte bei der Gutaufnahme liegt an der unterschiedlichen Bestimmung des Zeitpunktes, an dem die Gutaufnahme endet und das Binden beginnt. Bei diesem Elementwechsel stoppt der Schlepperfahrer die Fahrt und stößt mit dem Gespann zurück. Wie genauere Analysen ergaben, endete für den Zeitnehmer mit der Stoppuhr die Gutaufnahme mit dem kurzen Anhalten vor dem Zurückstoßen des Schleppers. Die Pick-up der Presse zieht aber beim Fahrzeugstillstand noch Erntegut aus dem Schwad, so daß der Strahlengang der Lichtschranke unterbrochen und Gutaufnahme in den automatisiert erfaßten Daten signalisiert wird. Die aufgetretenen Zeitdifferenzen sind also in erster Linie systembedingt.

Die erreichbare Genauigkeit der erfaßten Zeiten hängt auch von der Erfassungsrate der Daten ab. Um bei der automatisierten Erfassung eine ähnlich hohe Genauigkeit wie bei der manuellen Zeiterhebung zu erzielen, ist eine Aufdatungsrate von mindestens einer Sekunde erforderlich. Das im Deutschen Funknavigationsplan 1996 [35] geforderte Intervall von 3 s bei der vergleichbaren Überwachung von Maschinenbewegungen reicht für die exakte Arbeitszeitermittlung nicht aus. Die Verkürzung von 3 auf 1 s ist technisch kein Problem, da gegenwärtig verfügbare GPS-Empfänger ihre Daten sogar in noch kürzeren Abständen ausgeben können [11].

Der Erfolg der manuellen Auswertung basiert in erster Linie auf den Positionswerten, die der GPS-Empfänger ermittelt. Sie bilden die Grundlage zur Ableitung des Fahrweges, der einen sehr hohen Informationsgehalt aufweist. Durch die Kenntnis des Gesamtlaufes und/oder der Position des Fahrzeuges lassen sich Elemente wie das Rüsten erst erschließen. Auch fehlerhaft ermittelte Daten können mit dem Fahrweg identifiziert werden. So ist es z.B. möglich, einen Wendevorgang, der aufgrund einer Abdeckung der Lichtschranke fälschlicherweise als Gutaufnahme klassifiziert wurde, aufgrund der dargestellten Fahrspur als solchen zu erkennen.

Die Ergebnisse der manuellen Analysen belegen, daß die Zeiterfassung auf dem Feld ohne Zeitnehmerperson durchgeführt werden kann. Diese Aufwandseinsparung geht aber zu Lasten der manuellen Analyse am Rechner. Bei den manuellen Analysen war zu beobachten, daß bei einer entsprechend erfahrenen und trainierten Person der Zeitaufwand für die Auswertung niedriger ist, als die Zeit, die für die manuelle Datenerhebung beim Pressen benötigt wird. Außerdem wird durch die Verlagerung der Zeituntersuchung vom Feld ins Büro eine Unabhängigkeit von Ernteterminen erreicht.

Die automatisierte Erfassung erlaubt die nahezu aufwandfreie Erhebung von sehr vielen Arbeitszeitdaten. Dadurch eröffnet sich dem Arbeitswissenschaftler ein sehr breites Datenangebot, aus dem er je nach Zielsetzung auswählen kann. Ob die vollständige Aufschlüsselung einer fehlerfrei erfaßten Datei immer möglich ist, läßt sich aus den eigenen Ergebnissen nicht sagen. Es ist aber anzunehmen, daß eine finale Analyse stets durchführbar ist; bei wissenschaftlichen Analysen könnte aufgrund des umfangreichen Datenangebots eine nicht zu analysierende Datei übergangen werden. Außerdem verlieren wegen der großen Datenmenge und den statistischen Verrechnungen einzelne, nicht erkannte Fehler an Bedeutung.

5.4.3 Automatisierte Arbeitszeitanalyse mit SATAZA

Eine automatische Analyse der automatisiert erfaßten Arbeitszeitdaten konnte in dieser Form bislang noch nicht verwirklicht werden. SATAZA eröffnet die Möglichkeit einer schnellen und benutzerfreundlichen Auswertung mit einer vielfältigen Ergebnisausgabe.

Kernelemente der automatisierten Analyse sind die Algorithmen zur Erkennung der einzelnen Arbeitsabschnitte. Wie die Ergebnisse zeigen, kann mit diesen Prototypen ein Großteil einer Arbeitszeitdatei relativ genau ausgewertet werden. Die Summenzeit, die für die Gutaufnahme auf der Grafwiese ermittelt wurde, unterscheidet sich zwar von dem Wert mit der Stoppuhr um 59 cmin, aber zum Ergebnis der manuellen Analyse besteht mit 1 cmin praktisch keine Abweichung. Die Resultate der manuellen und der automatisierten Analyse weichen also um den gleichen Betrag von der Referenzzeit für die Gutaufnahme ab. Ursache dafür ist die bereits erläuterte, verfahrensbedingt unterschiedliche Definition des Endes der Gutaufnahme vor dem Binden. Diese Erkenntnis wird auch von den Werten der manuellen und der automatisierten Auswertung für die Gutaufnahme bei den einzelnen Ballen unterstützt.

Die Ursache der hohen Abweichungen bei der Gesamtzeit für das Wenden (36,7 %) und das Binden (-3,7 %) liegen hauptsächlich am letzten Ballen (siehe Abb. 45 und 46). Dieser unterscheidet sich insofern von den anderen, als bei ihm das Ballenbinden nicht durch die Bindeautomatik der Presse, sondern durch den Fahrer manuell ausgelöst wurde. Die manuelle Auslösung war notwendig, weil der Ballen die entsprechende Größe zur automatischen Auslösung nicht mehr erreicht hatte. Dadurch konnten auch keine Signale abgegriffen werden, die das Binden ankündigten. *SATAZA* war deshalb nicht in der Lage, dieses Binden zu erkennen. Aufgrund der Gegebenheiten ordnete es diesen Zeitblock dem Wenden zu. Zur Vermeidung dieses Fehlers wäre für den letzten Ballen ein modifizierter Algorithmus erforderlich, mit dem das manuelle Binden identifiziert werden könnte. Der überhöhte Wert für das Binden beim ersten Ballen beruht auf einer zu kurz ermittelten Zeit für die aufgetretene Unterbrechung während des Bindens.

Die zweite Hauptursache für Zeitunterschiede ist die ausbleibende Identifizierung des Rüstens. Da in *SATAZA* der entsprechende Erkennungsalgorithmus fehlt, kommt es fälschlicherweise zu einer Erhöhung der Wegezeit für die Hin- und die Rückfahrt sowie zu einer Beeinträchtigung der Zeiten für andere Arbeitselemente beim letzten Ballen. Deshalb wäre es trotz eines größeren Aufwandes wünschenswert, in einer Folgeversion von *SATAZA* die Analyse auf das Rüsten auszudehnen.

Das relativ einfache Erkennungsverfahren für Unterbrechungen in *SATAZA* erwies sich als brauchbar. Mit dieser Methode konnte beim Einsatz auf der Grafwiese bei der zweiten und dritten Unterbrechung die Dauer der Unterbrechung relativ genau ermittelt werden. Bei der ersten fiel die Dauer um 20 cmin zu kurz aus, da die automatisierte Analyse die Unterbrechung mit der Rückkehr des Fahrers auf den Sitz als abgeschlossen ansah, die Unterbrechung tatsächlich aber erst mit dem Beginn der Gutaufnahme endete. Der Algorithmus für die Erkennung einer Unterbrechung beim Binden müßte diesbezüglich erweitert werden.

Für eine Unterscheidung der Unterbrechungszeit nach dem Grund der Unterbrechung (technisch, organisatorisch oder persönlich) wäre sowohl eine größere Sensorikergänzung, als auch eine umfangreiche Softwareentwicklung erforderlich. Durch eine Überwachung von Maschinenkomponenten mit zusätzlichen Sensoren könnte ein Großteil von technisch bedingten Unterbrechungen erfaßt werden. Unterbrechungen aufgrund der Organisation treten beim Rundballenpressen praktisch nicht auf. Denkbar wäre aber, daß das Pressen unterbrochen werden muß, weil ein Schwad noch nicht fertig geschwadet ist oder das Pressen durch den

Abtransport oder das Wickeln von Ballen behindert wird. Zur Identifizierung von derartigen Unterbrechungen müßte bei sämtlichen beteiligten Fahrzeugen ein automatisiertes Erfassungssystem installiert und entsprechend aufwendige Analysealgorithmen entwickelt werden. Aufgrund des hohen Aufwandes und des relativ niedrigen Nutzens kommen aber derartige Erweiterungen für den Einsatz in der Praxis nicht in Frage.

Bisher unberücksichtigt blieb bei der automatisierten Analyse die Information, die in der abgeleiteten Fahrspur steckt. Wie bei der manuellen Analyse ersichtlich ist, könnten damit die Analysemöglichkeiten erheblich erweitert werden. Dabei ist aber zu bedenken, daß die Integrierung der Größe "Position" bzw. "Fahrweg" einen nicht unerheblichen Programmieraufwand verlangt. Für ein weiteres Vorgehen wäre es vermutlich günstiger, bei der Programmentwicklung zuerst den Arbeitsablauf stärker zu berücksichtigen, denn über eine Ablaufanalyse könnte ein großer Schritt hin zur Identifizierung des Rüstens getan werden.

Die Module, die zur vollständig automatisierten Analyse noch fehlen, können gegenwärtig durch die manuelle Auswertung in *SATAZA* ersetzt werden. *SATAZA* ist damit ein sehr leistungsfähiges Werkzeug für die Arbeitszeitanalyse. Die Ergebnisse können an Ackerschlagkarteien oder spezialisierte Datenbank- und Informationssysteme für weitere Berechnungen, wie z.B. die Erstellung von Planzeiten, übergeben werden. Zu diesen Systemen zählt z.B. auch *LISL*, das aber genauso wie andere Programme nicht in der Lage ist, Arbeits-/Prozeßelemente automatisch zu erkennen. Durch die in *SATAZA* enthaltene Schnittstelle zur Ergebnisübergabe an *LISL* können deshalb die Fähigkeiten beider Systeme für eine optimale Arbeitszeitanalyse genutzt werden.

5.4.4 Einflußfaktoren auf die Arbeitszeit

Mit dem aufgebauten Erfassungs- und Analysesystem wurde erreicht, daß Einflußfaktoren auf die Arbeitszeit beim Einsatz der Rundballenpresse, die bislang oft nur geschätzt wurden [17], nun relativ genau gemessen werden können.

Ein Großteil dieser Ermittlungen beruht auf GPS. Schlag-, Arbeits- und Wendeform können problemlos aus dem vom GPS-Empfänger festgehaltenen und in *SATAZA* dargestellten Fahrweg gefolgert werden. Zur einfachen Erkennung ist aber eine gewisse Mindestortungsgenauigkeit erforderlich. Der beim Empfänger von *FURUNO* festgestellte Ortungsfehler von

ca. ± 4 m (siehe Abb. 27) ist noch tolerierbar. Übersteigen aber die Fehler die 5 m-Marke, so wird es schwierig oder gar unmöglich, sichere Aussagen zu treffen.

Die GPS-Positionswerte bilden auch eine sehr gute Basis zur Messung von Distanzen. Das wurde am Beispiel der Schwadlängenmessung deutlich. Die Schwade wurden dabei aus dem Fahrweg mit Hilfe von *SATAZA* als die Abschnitte mit Gutaufnahme herausgefiltert. Da für die Gutaufnahme etwas überhöhte Zeiten ermittelt wurden, läge es nahe zu folgern, daß auch für die Schwadlängen zu hohe Werte entstehen müßten. Im Durchschnitt fallen aber die über GPS und *SATAZA* ermittelten Schwadlängen sogar etwas zu kurz aus. Dies hat seine Ursache in der geringen Geschwindigkeit während der letzten Zentiminuten vor dem Binden; und diese letzten Zentiminuten bilden die Zeitspanne, um die die Zeitangaben für die Gutaufnahme zu hoch ausfallen. Durch das Abbremsen vor dem Binden geht die Fahrgeschwindigkeit bis auf Null zurück, und so wird in den letzten Zentiminuten der Gutaufnahme eine sehr geringe Distanz zurückgelegt. Die Schwadlängenmessung wird deshalb nur geringfügig beeinträchtigt.

Neben den Ortungsfehlern des GPS-Empfängers und der Bestimmung des Anfangs- und Endpunktes der zu messenden Strecke wirkt sich als drittes die Datenausgaberate des Ortungsgerätes auf die Genauigkeit der Längenmessung aus. Je exakter die Streckenbestimmung sein soll, desto kürzer müssen die Ausgabeintervalle sein. Soll z.B. bei einer üblichen Geschwindigkeit von etwa 2 m/s beim Rundballenpressen der Streckenmeßfehler unter 2 m liegen, so muß mindestens einmal pro Sekunde die Position ausgegeben werden.

In den eigenen Untersuchungen wurden die Geschwindigkeiten noch auf Basis der Reed-schalter an den Rädern ermittelt. Genauso wie bei der Streckenmessung ist es sinnvoll, auch diese Aufgabe dem GPS zu übertragen, da GPS-Empfänger Geschwindigkeitswerte ausgeben können. Wie mittlerweile andere Untersuchungen gezeigt haben, ist die Genauigkeit der GPS-basierten Geschwindigkeitsbestimmung ähnlich hoch wie bei Messungen mit Radarsensoren [66, 103, 152].

Mit genauen GPS-Ortungsdaten und hohen Aufdatungsraten wird auch die exakte Flächenberechnung möglich. Für die Ermittlung der Schlagumhüllenden als Basis der Flächenberechnung waren für die Grafwiese noch die Messungen mit dem Bandmaß erforderlich. Diese manuelle Verfahrenskomponente ist aber hinderlich und muß deshalb ersetzt werden. In Frage käme hierfür die Erfassung der Schlaggrenzen durch vorheriges Umfahren des Schlages mit

einem GPS-bestückten Fahrzeug [119], die Ermittlung des Abstandes zwischen äußerstem Schwad und Schlaggrenze aus dem mittleren Schwadabstand oder die Übernahme des Schlagumrisses aus einer bereits vorhandenen digitalen Karte. Damit für Flächenberechnungen und Streckenmessungen in der graphischen Darstellung auf *AutoCad* verzichtet werden könnte, wäre es wünschenswert, *SATAZA* entsprechend zu erweitern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit *SATAZA* ein Großteil der entscheidenden Einflußgrößen auf die Arbeitszeit einfach und genau bestimmt werden kann. Die Ermittlung des noch fehlenden Faktors Ballengröße (bzw. -gewicht) soll im folgenden Kapitel über die Ertragsermittlung erläutert werden.

6 Ertragsermittlung

Bei der Ertragsermittlung soll die dynamische Gewichtsfeststellung auf Basis der Dehnungsmeßstreifentechnik im Vordergrund stehen. Aufbauend auf den Arbeiten von ROTTMEIER 1996 [145] und der von ihm verwendeten Meßtechnik (DMS im linken und rechten Achsstummel und in der Deichsel) sollen bei den eigenen Untersuchungen mit der Rundballenpresse folgende Schwerpunkte gesetzt werden:

- Systematische Analyse von Einflußgrößen auf die dynamische Wägung
- Glättung und Filterung der Gewichtssignale
- Erfassung von Beschleunigungen an verschiedenen Orten in der Presse und Bereinigung der Gewichtssignale mit der Beschleunigungsinformation
- Feststellung der erzielbaren Wägegenauigkeit beim Feldeinsatz

Im Gegensatz zu den Untersuchungen von ROTTMEIER 1996 [145] sollen die dynamischen Messungen mit einer wesentlich höheren Aufzeichnungsfrequenz durchgeführt werden.

6.1 Methodik und Versuchsdurchführung

Für eine Untersuchung von Einflußgrößen, die auf die dynamische Gewichtsermittlung wirken, muß zunächst festgestellt werden, welche gravierenden Einflüsse bzw. Störgrößen auftreten können.

6.1.1 Auswahl der zu untersuchenden Einflußfaktoren bei der dynamischen Wägung

Ein wichtiger Einflußfaktor ist die Bewegung der Presse. Bewegungen gehen auf Beschleunigungen zurück und führen in der Regel zu Schwingungen.

6.1.1.1 Beschleunigungsbedingte Einflüsse

Schwingungersatzsystem: Eine Darstellung eines vereinfachten Schwingungssystem für die Rundballenpresse mit den möglichen Bewegungsarten (Freiheitsgrade) zeigt Abbildung 48.

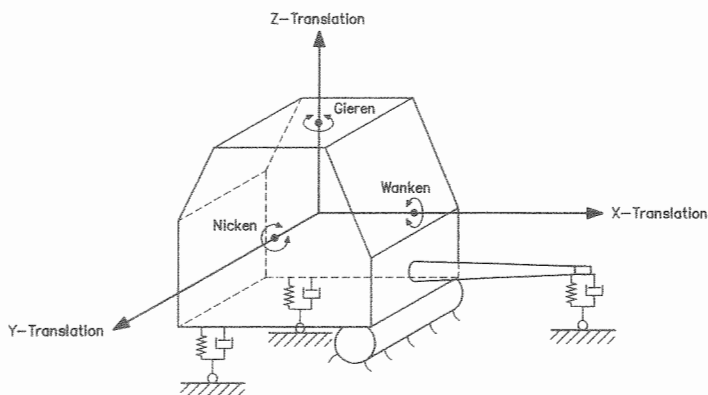


Abbildung 48: Schwingungersatzsystem für eine Rundballenpressen mit Freiheitsgraden (nach [56]).

Eine Presse kann als ein Feder-/Massesystem mit einer mehr oder weniger starken Dämpfung betrachtet werden. Das Modell zeigt die Presse als ein Einmassesystem, das zum Großteil den realen Gegebenheiten entspricht. Die federnde/dämpfende Eigenschaft wird durch Feder-/Dämpfungselemente (*Voigt-Kelvin-Modelle*) repräsentiert. Kennzeichnend ist, daß die Presse drei rotierende (Wanken, Nicken und Gieren) und drei translatorische Bewegungsarten aufweisen kann. Dadurch sind Gewichtsverlagerungen in der Maschine möglich.

Wankbewegungen führen zu Gewichtsverlagerungen von einer Fahrzeugseite zur anderen, Nicken zu Verlagerungen zwischen der Achse und der Deichsel. Wird von einer zu vernachlässigenden Hysterese im Fahrzeugrahmen und in der Federung ausgegangen, so führt diese Bewegung unter der Annahme, daß an den drei Abstützpunkten (Deichsel, linker und rechter Achsstummel) zum selben Zeitpunkt die Gewichtsmessung erfolgt, zu keiner veränderten Gesamtgewichtsangabe. Diese Verlagerungen sind somit wägeneutral.

Gieren, Translationen in X- und Y-Richtung, werden durch horizontallaufende Kräfte hervorgerufen; diese sind orthogonal zur Gewichtskraft und haben deshalb theoretisch keinen Einfluß auf die Wägung.

Beschleunigungen, die entlang der Z-Achse wirken, beeinflussen dagegen das Wägeregebnis. Sie überlagern die Erdbeschleunigung und führen zu fehlerhaften Werten bei der Wägung. In Fahrzeugen können sie durch äußere Einflüsse oder durch das Fahrzeug selbst verursacht werden.

Äußere Einflüsse: Bei den äußeren Einflüssen handelt es sich in erster Linie um Kräfte bzw. Beschleunigungen, die durch Überfahren von Fahrbahnebenheiten herbeigeführt werden. Die Unebenheiten verlaufen dabei sowohl längs als auch quer zur Fahrtrichtung. Da die Unebenheiten in ihrer Verteilung und Höhe rein zufällig sind, handelt es sich bei der Anregung des Fahrzeuges ebenfalls um einen rein zufälligen Vorgang, der durch keinen geschlossenen mathematischen Ausdruck beschrieben werden kann.

Zu den äußeren Einflüssen zählen auch störende Schwingungen, die vom Zugfahrzeug ausgehen und über das Zugmaul oder die Zapfwelle zur Presse gelangen. ROTTMEIER 1996 [145] wies auf diese Störungen bereits hin. Neben der Schwingungsübertragung kann die Gelenkwelle Vibrationen durch unrunden oder unwuchtigen Lauf auslösen. Zusätzlich muß aufgrund von Verspannungen in der Längenanpassung der Gelenkwelle mit nachteiligen Folgen für die Wägung gerechnet werden. Die durch das übertragene Drehmoment verursachten Wankbewegungen haben dagegen, wie bereits erläutert, keinen Einfluß auf die Gewichtsermittlung.

Innere Einflüsse: Bei den bisherigen Betrachtungen wurde bei der Rundballenpresse vom Einmassenschwinger ausgegangen. Da aber eine im Betrieb befindliche Presse eine Reihe sich bewegender Teile aufweist, handelt es sich um einen Mehrmassenschwinger. Je größer die Massen, je höher die Rotations- oder Translationsgeschwindigkeiten und je geringer die Dämpfung bei diesen Bauteilen ist, desto höher kann ihre Einflußkraft sein. Als ein Einflußfaktor in der Presse kommt die Pick-up in Frage. Die Stärke ihrer Schwingungen hängt vor allem von der Art der Aufhängung und der Tiefenführung ab. Schwingungen können auch durch die Preßeinrichtungen und deren Antrieb hervorgerufen werden. Ein Einfluß des Ballens könnte bei Konstantkammerpressen insbesondere zu Beginn des Ballenbildungsprozesses auftreten, da der Ballen in der Preßkammer noch viel Spielraum hat. Dem wirkt aber das geringe Ballengewicht in der Anfangsphase entgegen. Desweiteren kann die Hydraulikanlage insbesondere bei plötzlichen Druckänderungen - Druckstößen - störende Schwingungen hervorrufen [182]. Diese sind aber im wesentlichen auf die Abschnitte des Ballenbindens und Auswerfens beschränkt.

Schwingungscharakteristiken: Die bei einer Rundballenpresse auftretenden Drehzahlen leiten sich von der Zapfwelldrehzahl ab, die vom Schlepper übertragen wird; diese beträgt in der Regel 540 min^{-1} . Da in einer Rundballenpresse diese Drehzahl an den rotierenden Teilen nur selten hochtransformiert wird, kann von maximalen Drehfrequenzen von ca. 10 Hz

ausgegangen werden, die die Maschine in Schwingung versetzen. Auf Basis dieser Schwingungen und auch jener, die vom Antriebsfahrzeug kommen, können unter bestimmten Voraussetzungen sogenannte Überschwingungen entstehen, deren Frequenzen ein ganzzahliges Mehrfaches der Ausgangsfrequenz betragen [189]. Die Amplitudenhöhen liegen zwar unterhalb der Ausgangsamplitude, aber Überschwingungen können die Gewichtsermittlung erheblich beeinträchtigen, falls sie zu Resonanzen führen. Resonanzschwingungen treten auf, wenn die Erregerfrequenz der Eigenfrequenz eines Bauteils entspricht; sie können das 10- bis 100-fache der Amplitudenhöhe der Erregerschwingung erreichen [189].

Alle Schwingungen wandern durch die verschiedenen Bauteile der Rundballenpresse. Sie passieren unterschiedliche Materialien und Verbindungsstellen und gelangen auch zu den Sensoren zur Gewichtsermittlung, die sie negativ beeinflussen können. Je nach Weg werden die Schwingungen unterschiedlich stark gedämpft. Die Dämpfung kommt durch innere Hysterese und Reibung zustande. Sie ist in einer Presse nicht besonders ausgeprägt, weil es sich bei dieser Maschine um ein nahezu rein metallisches System handelt [189]. Die Frequenzen der wandernden Schwingungen werden nur wenig verändert. Die Amplitudenhöhen sind also kennzeichnend für den Weg durch die Maschine, die Frequenzen charakteristisch für die Schwingungsquelle [189].

6.1.1.2 Schwingungsfreie Einflüsse

Die in Abbildung 48 dargestellten möglichen Bewegungen einer Rundballenpresse bringen neben Schwingungen auch weitere Einflüsse mit sich, die die Wägeeinrichtungen in der Deichsel und in der Achse bzw. in den Achsstummeln beeinträchtigen können.

Wanken, Nicken und Gieren führen zu Änderungen der Auflagefläche und Verlagerungen der Zugöse im Zugmaul sowie zu einer Variation des Hebelarmes der Deichsel. Gieren verändert auch den Winkel zwischen den beiden Fahrzeuglängsachsen (Kurvenfahrt), Nicken die Auflagefläche der Reifen auf dem Boden und somit auch den Hebelarm, der an die mit Wägesensoren versehenen Achsstummel ansetzt. Auf die Bedeutung von Hebelarmänderungen hat ROTTMEIER 1996 [145] bereits hingewiesen. Sie wirken sich in erster Linie bei der Biegespannungsmessung negativ aus.

Nachteilige Wirkungen an den Achsstummeln können auch von der Zu- oder Abnahme des Rollwiderstandes ausgehen. Der Rollwiderstand eines Reifens ergibt sich aus dem Fahrzeuggesamtgewicht und der Rollwiderstandszahl, die hauptsächlich von der Art der Bereifung, vom Reifenluftdruck, von der Fahrgeschwindigkeit und der Fahrbahnbeschaffenheit abhängig ist. Zusätzlich könnten die beim Rollen auftretenden Torsionen bzw. Drehmomente sich ungünstig auf die DMS-Wägetechnik in den Achsstummeln auswirken [145].

Die vom Schlepper aufzubringende Zugkraft unterliegt Schwankungen. Sie wird über das Zugmaul mit Zugbolzen auf die Deichsel übertragen, passiert dort die Wägeeinrichtungen und könnte zu Störungen führen.

Desweiteren müssen störende Einwirkungen von der Pick-up erwartet werden. Zur besseren Bodenanpassung, vor allem bei unebenem Gelände, ist die Pick-up mit Stützrädern ausgestattet. Sehr häufig wird sie aber nicht nur von den Stützrädern, sondern auch von der Hubvorrichtung getragen, wobei die Anteile der beiden Träger an der Traglast besonders bei unebenen Fahrbahnen stark variieren können. Zusätzlich ist zu bedenken, daß trotz des Einsatzes von Stützrädern ein weiterer Bodenkontakt durch die Zinken der Pick-up möglich ist, insbesondere bei größeren Bodenunebenheiten quer zur Fahrtrichtung.

Von diesen Einflußfaktoren sollten bei den Untersuchungen an der Presse folgende berücksichtigt werden:

- Verlagerung der Deichsel (Zugöse) im Zugmaul des Schleppers
- Winkel zwischen den Längsachsen des Zugfahrzeugs und der Presse in der horizontalen Ebene
- Auflagefläche der Reifen auf dem Boden
- Rollwiderstand (Steigung der Reifenauflagefläche)
- Zugkraft an der Deichsel
- Abstützung der Pick-up auf dem Boden über die Stützräder
- Störschwingungen
 - bei ein- und ausgeschalteter Zapfwelle
 - bei Fahrzeugstillstand und beim Fahren
 - an unterschiedlichen Orten in der Presse

Eine ausführliche Untersuchung des Rollwiderstandeinflusses war nicht möglich, da auf einen Rollenprüfstand nicht zurückgegriffen werden konnte. Reifenart und Reifenluftdruck wurden deshalb als konstant vorgegeben. Mit Hilfe unterschiedlicher Steigungen der Reifenauflagefläche längs zur Fahrtrichtung sollten verschiedene Rollwiderstände bis zu einem gewissen Grad simuliert werden.

Da aus obigem Grund auch der Einfluß von Torsionen bzw. Drehmomenten an den Achsstummeln nicht ermittelt werden konnte, wurde versucht diese Einflüsse möglichst konstant zu halten.

Der Einfluß der Pick-up und der Preßeinrichtungen wird bei den Störschwingungsmessungen miterfaßt. Das gleiche gilt auch für die Auswirkungen des Ballens in der Preßkammer. Außerdem kann aufgrund der variablen Preßkammer der zur Verfügung stehenden Versuchsmaschine davon ausgegangen werden, daß dieser Einfluß nicht besonders groß sein wird.

6.1.2 Versuchsfahrzeuge

Für die Versuche wurden die bereits bei der Arbeitszeitmessung eingesetzte JOHN DEERE - Rundballenpresse, der FENDT-Schlepper und ein "Unimog U 140" von MERCEDES BENZ herangezogen (Tab. 19).

Tabelle 19: Kennwerte der Versuchsmaschine und eingesetzten Fahrzeuge.

Fahrzeug	Rundballenpresse	Schlepper	Unimog
Fabrikat	JOHN DEERE 550	FENDT 306 LSA Turbomatik	MERCEDES BENZ U 140
Baujahr	1993	1986	1993
Federung	nein	nein	ja
Reifengröße	31,0 x 13,5-15	vorne: 13,6 - R24 hinten: 18,4/70 R34	16,5/75 R20
Reifenluftdruck	1,5 bar	vorne: 1,7 bar hinten: 1,6 bar	3,0 bar
Leergewicht	1830 kg	4160 kg	4550 kg
Nutzlast	ca. 900 kg	-	-
zul. Deichsellast	1000 kg	-	-

Zur Vermeidung von zusätzlichen Einflußfaktoren wurden die Fahrzeugparameter während der Versuchsphase konstant gehalten. Die Gelenkwelle wies einen runden Lauf auf und wurde zur Vermeidung von Verspannungen gut eingefettet. Die Achsstummel und die Deichsel mit den DMS-Applikationen wurden von der Presse, die ROTTMEIER 1996 [145] einsetzte, ausgebaut und an die eigene, typgleiche Versuchsmaschine montiert.

6.1.3 Sensorik und Meßwerterfassung

An der Deichsel befanden sich drei Sensorsysteme zur Erfassung der Deichselstützlast (Abb. 49).

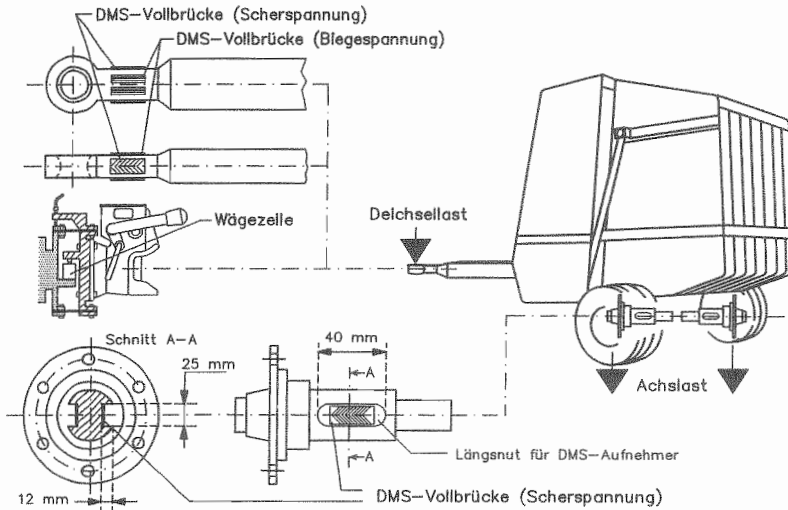


Abbildung 49: Sensorsysteme zur Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse (nach [145]).

Aufgrund der Erkenntnisse aus Vorversuchen wurde an der Deichsel neben der bereits vorhandenen DMS-Applikation zur Messung der Biegespannung ein weiterer Satz DMS (HOTTINGER BALDWIN, Typ XK 11K 3/350, Meßbereich bis 2000 μm) zur Scherspannungsmessung an der Deichsel angebracht. Diese Applikation erfolgte ebenfalls als DMS-Vollbrücke. Ein Nullpunkt-Abgleichwiderstand sorgte in der Vollbrücke für eine ausgeglichene Nullpunktlage. Zum Schutz der Applikationen vor Witterungs- und leichten mechanischen Einwirkungen, wurden die DMS zuerst mit einem speziellen Polyurethanlack und anschließend mit einer bitumenbeschichteten Aluminiumfolie überzogen.

Zusätzlich wurde die Deichselstützlast mit einer 2 t-Wägezelle (BONGSHIN, Korea, Typ 2000 DBC) ermittelt. Da ein derartiger Kraftmesser nur schwer in eine Rundballenpresse zu integrieren ist, wurde eine selbstkonstruierte Anhängerkupplung eingesetzt. Diese ursprünglich von ROTTMEIER 1996 [145] gebaute und für die eigenen Versuche weiterentwickelte Anhängerkupplung besteht aus zwei parallel geführten Rahmen, die zur Aufnahme der horizon-

talen Kräfte über vier Federstahlbänder miteinander verbunden sind. Zur Messung der Stützlasterlast trägt der schlepperseitige Rahmen über die Wägezelle den anhängerseitigen Rahmen mit dem Zugmaul. Durch diese Konstruktion sollten Störungen durch Seitenkräfte vermieden werden.

In den Achstummeln waren zur Messung der Scherspannung je eine DMS-Vollbrücke, bestehend aus DMS (XK 11K 3/350), appliziert. Zur Erhöhung der durch die Querkraft verursachten Scherspannung wiesen die Stummel eine Schwächung in Form zweier ausgefräster Längsnuten auf. Dadurch betrug der Querschnitt an Stelle von regulär 15,2 nur 10 cm². Da diese Bauteile eine Doppel-T-Form aufweisen, verfügen sie nach wie vor über eine große Stabilität gegen Verbiegung.

Die Spannungsversorgung und die Signalverstärkung der DMS-Applikationen erfolgte mit einer Verstärkerelektronik (BURR-BROWN). Das Elektronikboard stellt exakt 10,000 V Speisespannung zur Verfügung und verstärkt das Rohsignal (Kleinsignal von maximal 20 mV bei Maximallast) auf maximal 5 V.

Zur Messung der Schwingungen bzw. Beschleunigungen wurden drei baugleiche Beschleunigungssensoren (DR. SEITNER SYSTEM- UND SENSORTECHNIK, Typ B1) eingesetzt. Ihr Meßverfahren beruht auf einem gasdynamisch gedämpften Feder-Masse-System als Bestandteil eines kapazitiven Primärwandlers. Die Sensoren weisen einen Meßbereich von ± 3 g mit einer Auflösung von 10^{-3} g auf. Mit einem Filter-/Normierverstärker (DR. SEITNER SYSTEM- UND SENSORTECHNIK, Typ NV8a) erfolgte die Spannungsversorgung eines Sensors und die Kalibrierung des Beschleunigungssignals auf 1000 mV/g bei einem Ausgabebereich von 0 bis 5 V. Für die einzelnen Versuchsvarianten waren die Sensoren an unterschiedlichen Orten in der Presse angebracht (Abb. 50).

Die gesamte Meßkette ist in Abbildung 51 zu sehen.

Die Signale der Wägeeinrichtungen und der Beschleunigungssensoren wurden mit einer PC-Einsteckkarte (ANALOG DEVICES, Typ RTI-834H-32) in einem Industrie-PC (KONTRON, Modell "IP LITE Color 486" mit 8 MB Arbeitsspeicher, 33 MHz Taktfrequenz und 500 MB Festplatte) erfaßt. Die Stromversorgung dieses Rechners erfolgte mit Hilfe einer 12 V-Fahrzeuggestaltungsbatterie und einem Wandler, der die Spannung auf 220 V hochtransformierte. Das Meßboard stellt 32 Analog- und 16 Digitalkanäle bei einer Auflösung von 12 bit zur Verfügung. Die maximale Aufzeichnungsrate beträgt 200 kHz.

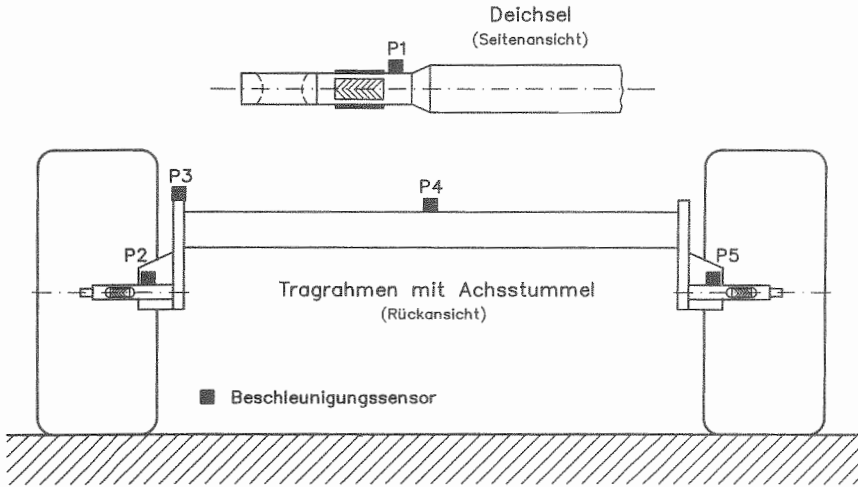


Abbildung 50: Applikationsorte der Beschleunigungssensoren in der Rundballenpresse.

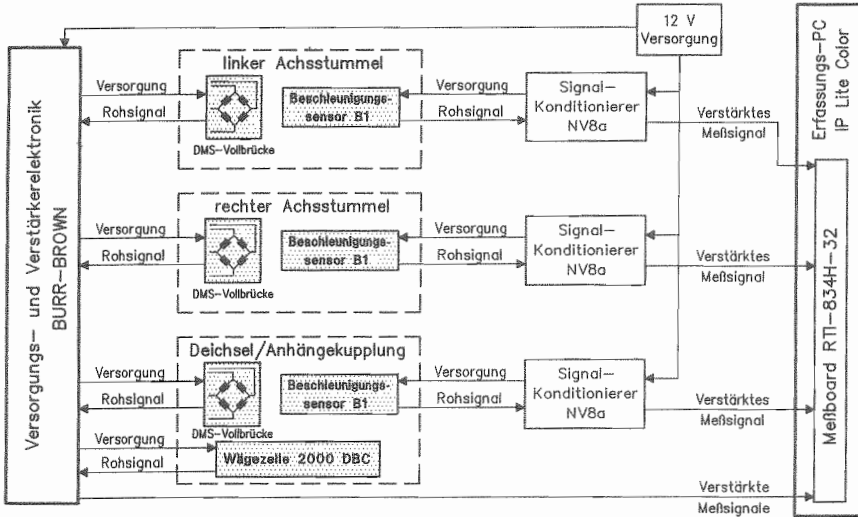


Abbildung 51: Meßtechnik zur Gewichts- und Schwingungsmessung in der Rundballenpresse.

Die Konfiguration und Erfassung erfolgte mit dem Softwarepaket *Labtech Notebook*, Version 7.3 (LABORATORY TECHNOLOGY CORPORATION). Die Meßwerte der Gewichtssensoren wurden einzeln erfaßt. Aufgrund der begrenzten Aufnahmefähigkeit der Meßkarte bei hohen Abtastraten wurden bei einem Meßzyklus nur jeweils drei Gewichtssensoren (Deichsel, linker und rechter Achsstummel) und die drei Beschleunigungsmesser erfaßt. Zur Datenspeicherung diente der Industrie-PC.

Schwingungen mit Frequenzen von bis zu 100 Hz sollten sicher erfaßt werden. Diese Grenze wurde von den zu erwartenden Schwingungsfrequenzen (30 Hz Motordrehzahl mit maximal zweiter Überschwungung) und dem dynamischen Verhalten des DMS abgeleitet. Zeitliche Gewichtsänderungen, die über die Eigenfrequenzen eines Dehnungsmeßstreifen hinausgehen, werden von ihm nicht mehr erfaßt [3]. Aufgrund der Applikationsparameter und der möglichen Lasten, liegen die Eigenfrequenzen nicht über 100 Hz [59]. Zur Einhaltung des *Nyquist*-Kriteriums und zur Vermeidung von Aliasingfehlern [189] wurde deshalb für die Meßwerterfassung eine Signalabtastrate von 200 Hz gewählt.

Mit Hilfe des Aufzeichnungsprogramms konnten die Meßwerte während des Versuchs auch auf dem Computerbildschirm ausgegeben werden. Zur leichteren Ablesbarkeit wurden die Meßwerte mit einer gleitenden Mittelwertberechnung über 400 Werte geglättet. Mit den Werten am Bildschirm erfolgte die Kalibrierung der Wägetechnik nach der von ROTTMEIER 1996 [145] beschriebenen Methode. Dabei wurden für die einzelnen Gewichtssensoren die Kalibrierfaktoren so gewählt, daß 1 mV einem Kilogramm entsprach.

6.1.4 Versuchsanlage und Versuchsdurchführung

Die Untersuchungen wurden je nach Meßzweck an unterschiedlichen Orten durchgeführt. Alle Aufzeichnungen begannen frühestens 10 min nach dem Einschalten der Meßtechnik.

6.1.4.1 Messung der Einflußfaktoren und der Wägegenauigkeit

Die Versuche, die bei Fahrzeugstillstand erfolgten, wurden in einer Maschinenhalle mit ebenem Betonboden durchgeführt. Die Fahrversuche fanden auf einem befestigten Feldweg (Teststreckenlänge: 100 m), auf einer Wiese (50 m) und einer Asphaltstraße (50 m) statt.

Für die Erfassung der einzelnen Einflußfaktoren wurde wie folgt vorgegangen:

Verlagerung der Deichsel (Zugöse) im Zugmaul entlang der Fahrzeuglängsachse: Aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser von Zugöse, Zugbolzen und Zugbolzenloch im Zugmaul, ergibt sich bei angehängter Presse für die Deichsel im Zugmaul des FENDT-Schleppers ein maximaler Bewegungsspielraum von 13 mm in alle Richtungen der horizontalen Ebene. Da die spielfreie Anhängung als Basis für Referenzwerte nicht zu realisieren war, erfolgte eine Ermittlung der maximalen Fehlerspannweite, die durch die Verlagerung entlang der Fahrzeuglängsachse hervorgerufen werden kann. Untersucht wurden die beiden Extremlagen (die gleichzeitig beim Einsatz der Presse am häufigsten vorkommen), nämlich bei Zug des Schleppers (Zugöse ist maximal aus dem Zugmaul herausgezogen) und Schub der Presse (Zugöse ist maximal in das Zugmaul hineingeschoben). Zuerst wurden bei ganz herausgezogener Deichsel die Gewichtswerte bei Fahrzeugstillstand abgelesen, anschließend wurde der Schlepper zurückgesetzt, bis die Zugöse soweit wie möglich in das Zugmaul hineingeschoben war. Dann wurde wieder im Stand gewogen. Die Gewichtsermittlung erfolgte in den Achsen immer über die Scherspannungsmessung, in der Deichsel über Scher- und Biegespannungsmessung sowie mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung.

Winkel zwischen den Längsachsen des Zugfahrzeugs und der Presse: Die beiden Fahrzeuglängsachsen wurden mit Hilfe von Loten auf den Boden projiziert und markiert, die Winkelmessung zwischen den beiden Achsen erfolgte mit einem Winkelmesser an den Markierungspunkten am Boden. Ausgehend von einem Winkel von 180° , d.h., daß die Längsachsen des Schleppers und der Presse auf einer Geraden lagen (Geradeausfahrt), wurde der Winkel in Schritten von 10° reduziert. Zur Winkeländerung wurde das Zugfahrzeug abgehängt, weggefahren und unter einem neuen Winkel an die Presse herangefahren.

Auflage der Reifen auf dem Boden: Da auf beiden Fahrzeugseiten von gleichen Bedingungen ausgegangen werden kann, erfolgte diese Untersuchung nur am linken Rad. Mit Hilfe einer Plattform wurde die Auflagefläche variiert (Abb. 52).

In Fahrzeuglängsrichtung hatte der Reifen immer volle Auflage, verändert wurde nur die Breite der Auflagefläche in Querrichtung. Ausgehend von der vollen Auflage wurde die Plattform in Inkrementen von 5 cm versetzt, bis die Auflagefläche nur noch eine Breite von 5 cm aufwies. Bei der ersten Versuchsvariante (I) erfolgte die Versetzung der Plattform von innen nach außen, bei der zweiten (II) von außen nach innen. Zum Verrücken der Plattform wurde die Presse mit einem Wagenheber angehoben.

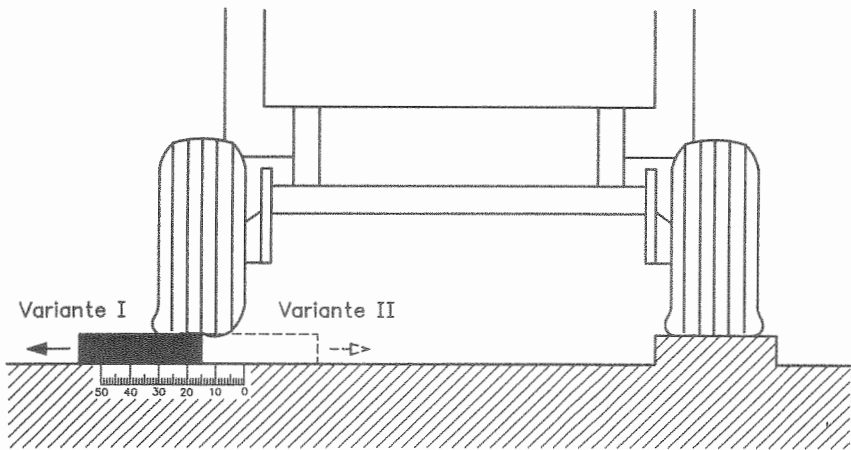


Abbildung 52: Versuchsanlage zur Ermittlung des Einflusses der Reifenauflagefläche bei der Gewichtsermittlung mit DMS am Achsstummel.

Rollwiderstand (Steigungswinkel der Reifenauflagefläche): Mit Hilfe einer Rampe, deren Steigungswinkel variiert werden konnte, wurde eine Teilsimulation des Rollwiderstandes durchgeführt (Abb. 53).

Durch die Messung im Stand sollten störende dynamische Überlagerungen ausgeschlossen werden. Zur Änderung des Steigungswinkel wurde die Presse nach jeder Messung von der Rampe heruntergefahren.

Zugkraft: Eine direkte Messung der Zugkraft an der Deichsel bei gleichzeitiger Gewichtsermittlung wäre von der Technik her sehr aufwendig gewesen. Deshalb wurde die Zugkraft an der Deichsel indirekt ermittelt (Abb. 54).

Mit Hilfe einer Kette wurde die Fahrzeugachse mit einem festen Anhängepunkt an einer Wand verbunden. In die Kette war eine Zugmeßzelle und ein Seilspanner eingebaut. Durch Verkürzen des Seilspanners ließ sich die Zugkraft in Schritten von 500 N erhöhen. Die Messungen erfolgten im Stand.

Abstützung der Pick-up auf dem Boden über die Stützräder: Bei der eingesetzten Presse ist an der linken und rechten Seite der Pick-up mit Hilfe einer Spiralfeder ein Stützrad federnd angebracht. Die Pick-up wird mit einem einfachwirkenden Hubzylinder angehoben.

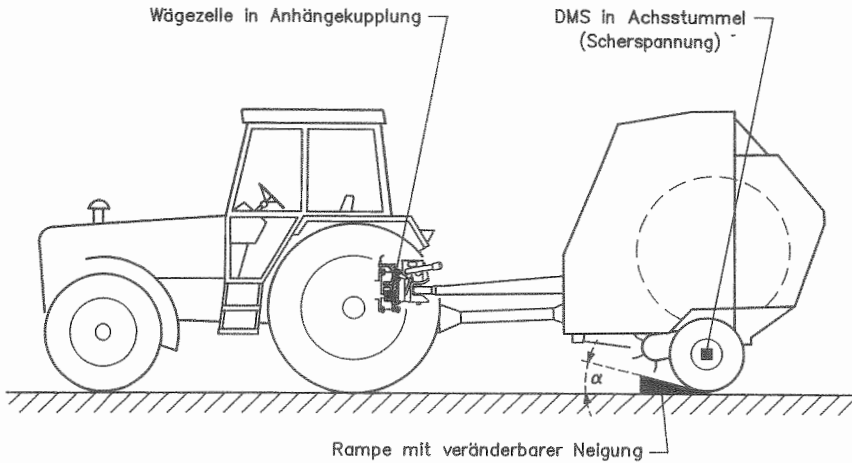


Abbildung 53: Versuchsanlage zur Teilsimulation einer Rollwiderstandsänderung mit einer variablen Rampe.

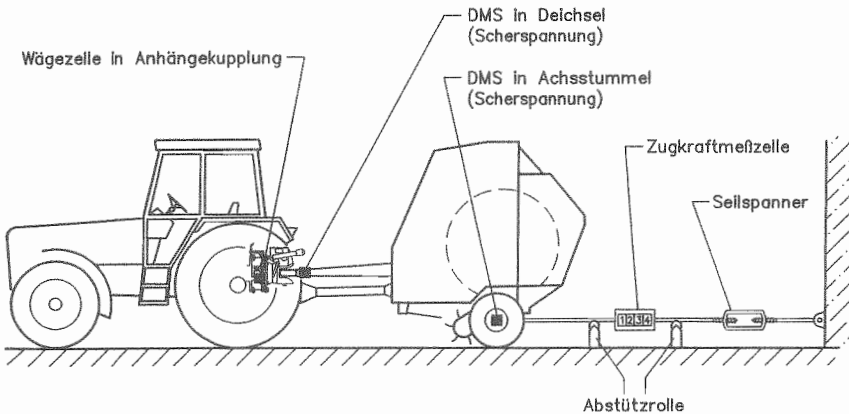


Abbildung 54: Versuchsanlage zur Ermittlung des Zugkrafteinflusses bei der Gewichtsermittlung mit DMS.

Durch einen verstellbaren mechanischen Anschlag kann die maximale Absenktiefe eingestellt werden. Wird diese Hilfe benutzt, so setzt der Schlepperfahrer beim Pressen den Hebel des hydraulischen Steuerungsventils zum Anheben der Pick-up üblicherweise auf Schwimmstellung. Paßt sich die Pick-up Bodenunebenheiten durch Höhenverlagerung an, so wird innere Reibung im Hydrauliksystem (Hubzylinder, Schlauchleitungen, Ventile usw.) überwunden.

Befindet sich der Steuerungsventilhebel in Sperrstellung, so werden die Bodenebenheiten in erster Linie von der Stützradfederung aufgefangen.

Aufgrund dieser Gegebenheiten war es schwierig, eindeutig definierbare Situationen mit unterschiedlich starker Abstützung der Pick-up auf dem Boden über die Stützräder zu finden. Deshalb wurde nur bei zwei verschiedenen Abstützungssituationen, die für den alltäglichen Einsatz typisch sind, gemessen: Bei frei hängender Pick-up, d.h. ohne Bodenkontakt, und bei einer Abstützung, bei der die Stützradfederung zur Hälfte durchgedrückt war. Dabei befand sich der Hebel des Hydraulikventils in Sperrstellung. Mit zwei Wagenhebern wurden das linke und rechte Stützrad bei abgesenkter Pick-up angehoben, bis die Federn zur Hälfte durchgedrückt waren.

Fahrbahn: Testfahrten auf unterschiedlichen Fahrbahnen mit Fahrzeugstop zur Messung sollten über die Größenordnung der gesamten Einflußkraft der schwingungsfreien Einflüsse Auskunft geben. Dazu wurde die 50 m lange Strecke auf der Asphaltstraße und auf der Wiese abgefahren, nach jeweils etwa 4 m angehalten und im Stillstand die Gewichtswerte abgelesen.

Störschwingungen: Diese Messungen der Gewichte und der Beschleunigungen erfolgten auf der 100 m-Teststrecke des befestigten Feldweges. Die Meßfahrten begannen ca. 20 m vor dem Streckenbeginn, so daß bei der Startlinie der Teststrecke die erwünschte Fahrgeschwindigkeit bereits erreicht war.

6.1.4.2 Feldversuche mit dem Lückenschwad

Zur differenzierten Beurteilung der Wägenauigkeit diene ein Schwad (angewelktes Gras) mit Lücken (Abb. 55).

Eine 30 kg-Plattformwaage (Auflösung 0,001 kg) diene zur separaten Wägung der einzelnen Teilstücke des Schwads. Anschließend wurde der ganze Lückenschwad in einem Durchgang gepreßt und die Daten der dynamischen Wägung aufgezeichnet. Bei Fahrzeugstillstand und ausgeschalteter Zapfwelle wurde zusätzlich das Gewicht des Ballens in der Presse am Bildschirm des Erfassungs-PCs abgelesen. Nach dem Auswerfen des Ballens erfolgte eine Referenzwägung des Ballens mit einer 800 kg-Kranwaage (Auflösung 0,1 kg) am Frontlader eines Schleppers.

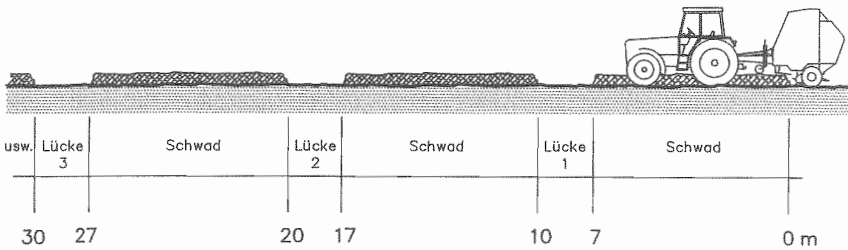


Abbildung 55: Lückenschwad zur Ermittlung der Genauigkeit bei der dynamischen Wägung.

6.2 Datenanalyse

Da zur Datenanalyse z.T. sehr unterschiedliche Verfahren erforderlich waren, wurden folgende drei PC-Programme zur Auswertung eingesetzt: Das Tabellenkalkulationsprogramm *Excel*, das Statistikpaket "SAS", Version 6.11, von SAS INSTITUTE CORPORATION und das Meßdatenanalyseprogramm "DIA", Version 5.0 von GFS.

Zu Beginn der Analyse wurden von den Gewichtssignalen die Tarawerte (Gewicht der Rundballenpresse) abgezogen, so daß das reine Nettosignal übrig blieb. Bei den schwingungsfreien Einflußfaktoren wurden in Abhängigkeit von der Zielsetzung entweder die arithmetischen Mittelwerte aus den Wiederholungen berechnet oder Regressionsmodelle eingesetzt, wobei Regressionsgeraden als Ausgangsmodelle dienten. Die Eignungsüberprüfung eines Modells erfolgte mit Hilfe des "Lack-of-Fit"-Tests von SAS und einer visuellen Analyse der graphischen Residuendarstellung. Mußte die Gerade als Regressionsmodell abgelehnt werden, so wurde eine schrittweise multiple Regression mit den ursprünglichen und transformierten Gewichtssignalen durchgeführt. Die Aufnahme von unabhängigen Variablen in die Regressionsgleichung geschah anhand der Höhe des Bestimmtheitsmaßes B und "*Mallows $C(p)$* " [1].

Bei den beschleunigungsbedingten Einflüssen wurden die Signale (alle in digitaler Form vorliegend) für eine genauere Beurteilung und zur besseren Vergleichbarkeit mit Hilfe der

Fast-Fourier-Transformation (FFT) vom Zeitbereich in den Frequenzbereich überführt [160], so daß sich die frequenzmäßige Zusammensetzung eines digitalen Signals zeigte.

Ausgehend von den Ergebnissen der Signalanalyse mit der FFT, wurden zur Ausblendung von beschleunigungsbedingten Einflüssen Filter- und Glättungsverfahren ausgewählt und getestet.

Zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen den Gewichts- und Beschleunigungswerten, als Basis einer Bereinigung der Gewichtswerte, wurden die Werte graphisch dargestellt und ihre Korrelation visuell festgestellt. Eine Berechnung der Korrelationskoeffizienten erfolgte nicht, da bei derartigen Datensätzen keine interpretierbaren Ergebnisse zu erwarten waren.

Die Durchsätze ließen sich durch Differenzieren der gefilterten bzw. geglätteten Gewichtssignale nach der Zeit bestimmen.

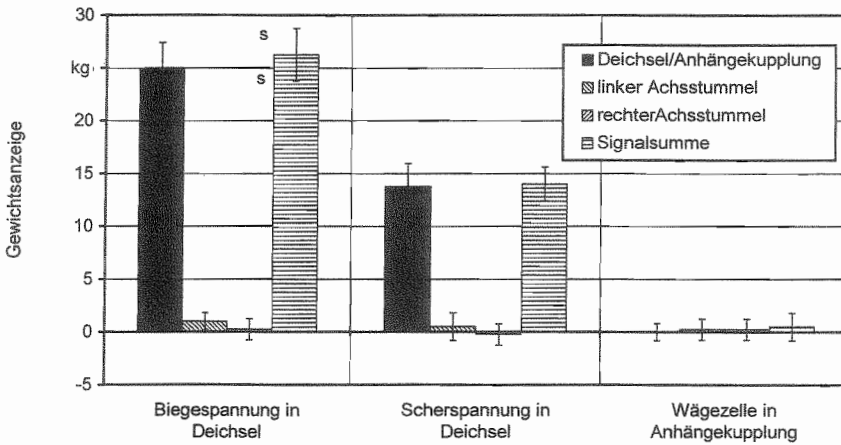
6.3 Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden werden zunächst die schwingungsfreien Einflüsse auf die Gewichtsermittlung dargestellt und diskutiert. Anschließend sollen die beschleunigungsbedingten Einflüsse, d.h. die Einwirkungen der Schwingungen und deren Eliminierung, behandelt werden. Danach folgen die Ergebnisse der Genauigkeitsbetrachtung der dynamischen Gewichtsermittlung und den Abschluß bilden die Resultate der Durchsatzberechnung.

6.3.1 Schwingungsfreie Einflüsse

6.3.1.1 Einfluß der Verlagerung der Zugöse im Zugmaul entlang der Fahrzeuglängsachse

In Abhängigkeit von der verwendeten Technik zur Lastfeststellung in der Deichsel sind bei der Verlagerung der Zugöse z.T. sehr unterschiedliche Gewichtsangaben bzw. Meßfehler zu verzeichnen (Abb. 56).



Scherspannungsmessung in Achsstummel

s: Standardabweichung

Abbildung 56: Veränderung der Gewichtswerte nach Hineinschieben der Zugöse ins Zugmaul bei unterschiedlichen Verfahren der Gewichtsermittlung (\bar{x} bei $n=4$).

Die Abbildung zeigt die Veränderung der Gewichtswerte, nachdem die Zugöse ins Zugmaul hineingeschoben wurde. Sie führt bei der Biegespannungsmessung mit ca. 25 kg zur größten Differenz und damit zum höchsten Fehler. Bei der Scherspannungsmessung ergeben sich fehlerhafte Gewichtswerte, die aber nur etwa halb so hoch sind wie bei der Biegespannung. Dagegen bleibt die Gewichtsermittlung mit der Wägezelle von der Verlagerung nahezu uneinträchtigt.

Aufgrund der hohen Abhängigkeit der Gewichtsermittlung über die Biegespannungsmessung bei der Verlagerung der Zugöse im Zugmaul, wurde dieses Meßverfahren bei den weiteren Versuchen ausgeklammert, da eine Verlagerung bei der Untersuchung anderer Einflußgrößen nicht immer ausgeschlossen werden kann.

6.3.1.2 Einfluß der Zugkraft an der Deichsel

Eine hochsignifikante Abhängigkeit (Signifikanzniveau $\alpha = 0,1 \%$) der Gewichtsermittlung von der Zugkraft an der Deichsel zeigt sich bei der Scherspannungsmessung an der Deichsel (Abb. 57).

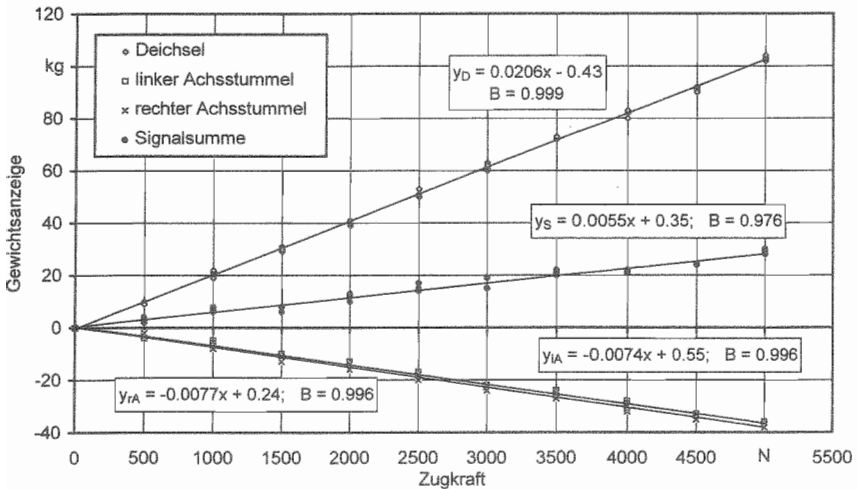


Abbildung 57: Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Zugkraft an der Deichsel (Scherspannungsmessung in Deichsel und im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).

Durch eine Erhöhung der Zugkraft findet eine Gewichtsverlagerung von der Achse hin zur Deichsel statt. Die Gewichtssignale an der Deichsel übersteigen aber die durch die Verlagerung bedingte Gewichtserhöhung, so daß überhöhte und damit fehlerhafte Gesamtgewichtswerte zu verzeichnen sind. Der Fehler beträgt pro 1000 N Zugkraft knapp 6 kg.

Ein anderes Bild ergibt sich dagegen bei der Gewichtsermittlung mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung (Abb. 58).

Die Gewichtszunahme an der Deichsel entspricht der Gewichtsabnahme am linken und rechten Achsstummel. Die Zugkraft hat somit keinen signifikanten Einfluß auf die Wägung.

Da die Scherspannungsmessung sowohl von der Auflage der Zugöse im Zugmaul als auch von der Zugkraft erheblich beeinträchtigt wird, wurden alle weiteren Versuche nur noch mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung zur Lastermittlung im Deichselbereich durchgeführt.

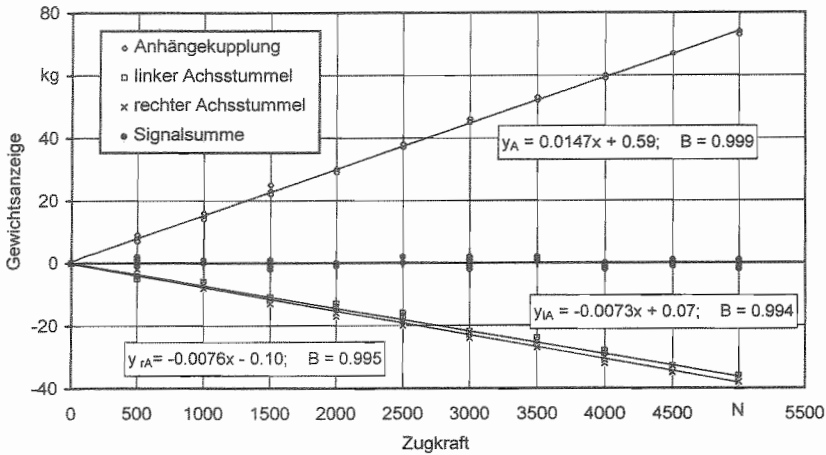


Abbildung 58: Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Zugkraft an der Deichsel (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).

6.3.1.3 Einfluß des Winkels zwischen den Fahrzeuglängsachsen

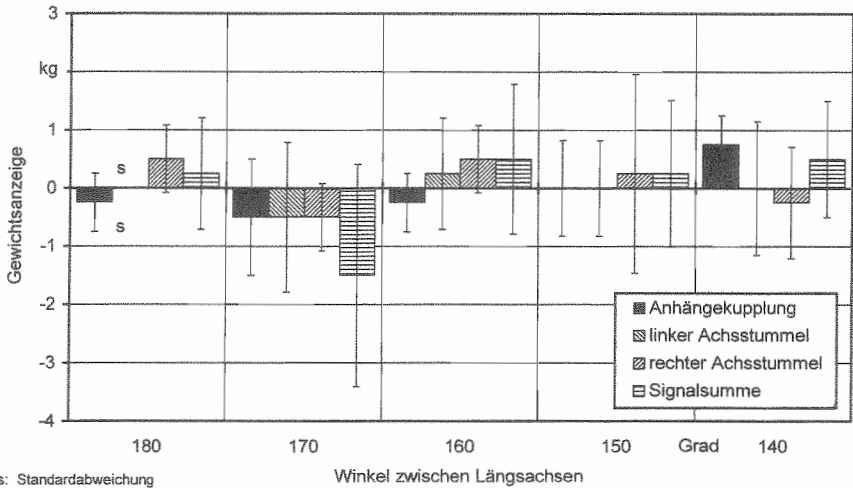
Veränderungen des Winkels zwischen den Längsachsen des Schleppers und der Presse, die durch Kurvenfahrten entstehen, führen bei der Gewichtsermittlung mit Hilfe der Wägezelle zu keinen nennenswerten Fehlern. Abbildung 59 zeigt die Gewichtssignale, ermittelt mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung und der Scherspannungsmessung in den Achsstummeln, bei unterschiedlichen Winkeln.

Die Mittelwerte der Messungen liegen mit einer Ausnahme in einem Bereich von ± 1 kg.

6.3.1.4 Einfluß der Auflage der Reifen auf dem Boden

Eine starke Abhängigkeit ($\alpha = 0,1$ %) besteht zwischen dem ermittelten Gewicht und der Reifenauflagefläche auf dem Boden (Abb. 60).

Dargestellt sind die Ergebnisse für die Verringerung der Auflagefläche des linken Reifens von innen nach außen. Während an der Deichsel keine signifikante Änderung der Werte zu



s: Standardabweichung

Abbildung 59: Gewichtssignale in Abhängigkeit vom Winkel zwischen den Fahrzeuglängsachsen von Schlepper und Presse (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; \bar{x} bei $n=4$).

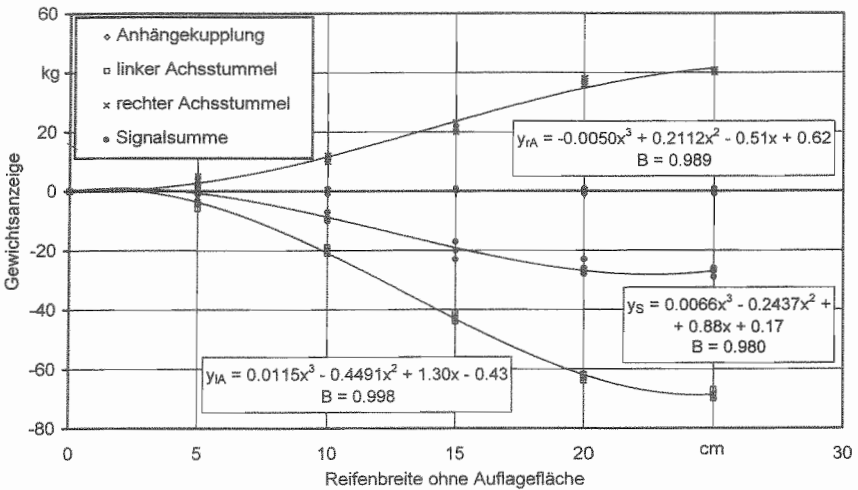


Abbildung 60: Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Auflagefläche des Reifens auf dem Boden (Verringerung von innen nach außen; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).

erkennen ist, nehmen sie am linken Achsstummel ab, am rechten zu. Da die Abnahme größer ist als die Zunahme, ergibt sich für das gemessene Gesamtgewicht insgesamt eine Verringerung bis zu etwa 30 kg.

Wird die Auflagefläche von außen nach innen reduziert, so sind die Abhängigkeiten entgegengesetzt: Am linken Achsstummel nehmen die Werte ab, am rechten nehmen sie zu. Aufaddiert führen die drei Einzelsignale zu überhöhten Gewichtswerten von bis zu 20 kg (Abb. 61).

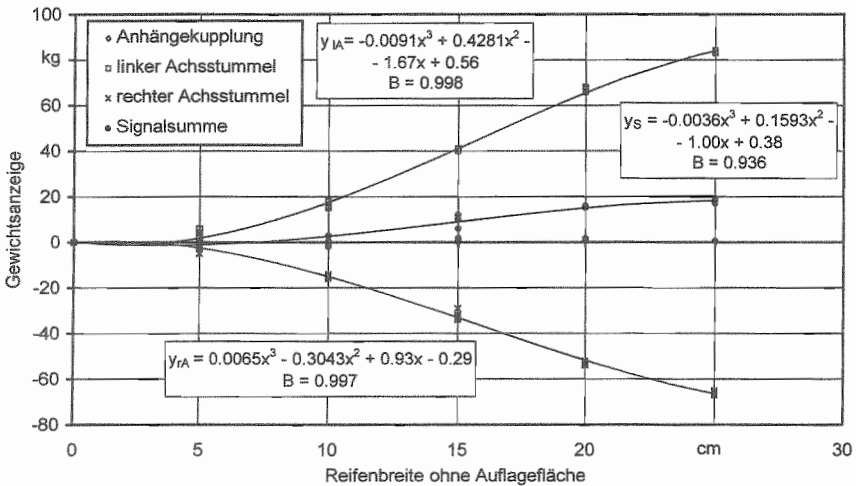


Abbildung 61: Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Auflagefläche des Reifens auf dem Boden (Verringerung von außen nach innen; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; n=4).

6.3.1.5 Einfluß des Steigungswinkels der Reifenauflagefläche

Zwischen der Steigung der Reifenauflagefläche und der Signalsumme besteht ebenfalls ein signifikanter Zusammenhang ($\alpha = 0,1 \%$), der linear ist. Eine Zunahme der Steigung führt zu einer Erhöhung der Gewichtswerte an der Anhängerkupplung, die stärker ist als die Abnahme an den beiden Achsstummeln, so daß insgesamt ein Anstieg zu verzeichnen ist (Abb. 62).

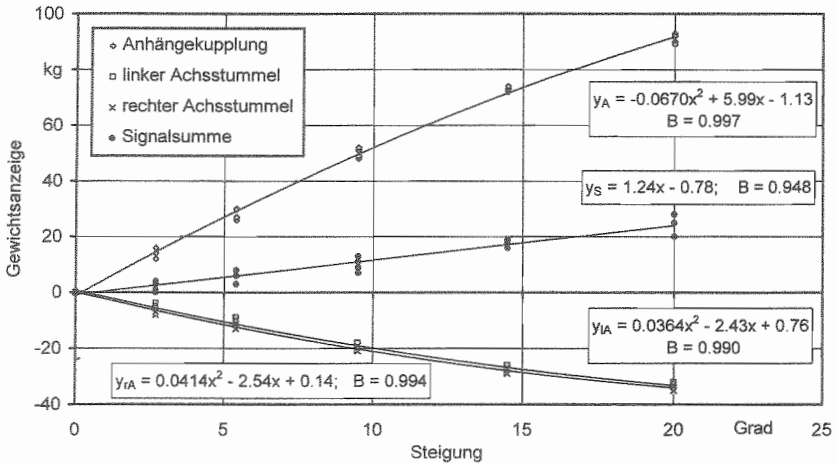


Abbildung 62: Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Steigung der Reifenauflagefläche (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; $n=4$).

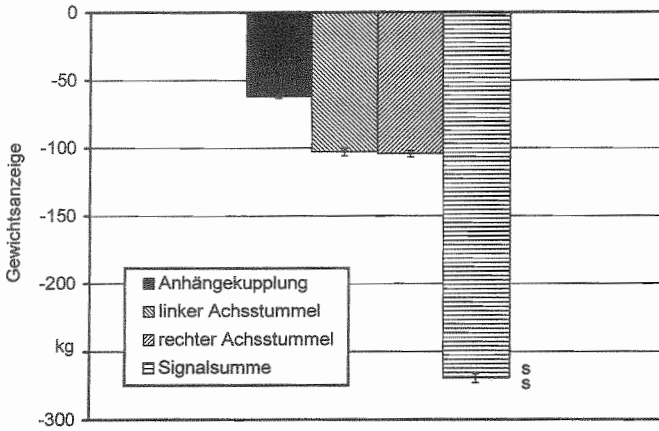
6.3.1.6 Einfluß der Pick-up-Abstützung auf dem Boden

Durch die Abstützung der Pick-up auf dem Boden über die Stützräder nimmt das angezeigte Gewicht ab (Abb. 63).

Die Verringerung des Gewichtssignals tritt sowohl an der Anhängerkupplung als auch zu gleichen Teilen an den beiden Achsstummeln auf. Im Vergleich zur freihängenden Pick-up, geht das angezeigte Gewicht, bei einer Abstützung, die die Federung der Stützräder halb durchdrückt, um etwa 275 kg zurück.

6.3.1.7 Schwingungsfreie Einflüsse der Fahrbahn

Je nach Fahrbahnart führen schwingungsfreie Einflüsse zu unterschiedlich hohen Wägefehlern. Abbildung 64 zeigt beispielhaft die Abweichungen vom Sollgewichtswert bei Gewichtsmessungen - während das Fahrzeug stillstand - nach jeweils ca. 4 m Fahrt auf der Asphaltstraße.



Bei Ausgangslage (Pick-up ohne Bodenkontakt) Gewichtsanzeige = 0 kg
 s: Standardabweichung

Abbildung 63: Gewichtssignale in Abhängigkeit von der Pick-up-Abstützung über die Stützräder (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel; n=4).

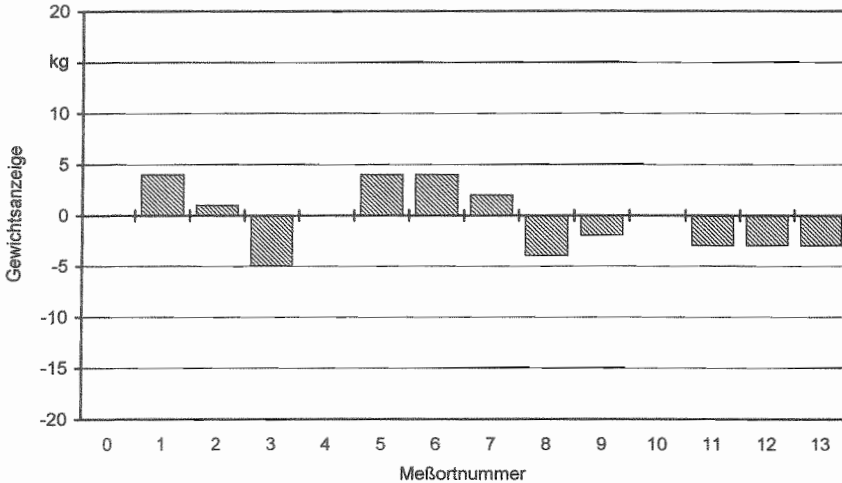


Abbildung 64: Gewichtsabweichungen vom Sollwert bei Messungen auf der Asphaltteststrecke (Messung bei Fahrzeugstillstand nach jeweils ca. 4 m Fahrt; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung in Achsstummeln; n=1).

Ausgehend von einer Last von 0 kg vor Fahrtbeginn, änderte sich das angezeigte Gewicht in einem Bereich von etwa ± 4 kg. Wesentlich größer waren die ermittelten Abweichungen vom Sollgewicht bei den Messungen auf der Wiese (Abb. 65).

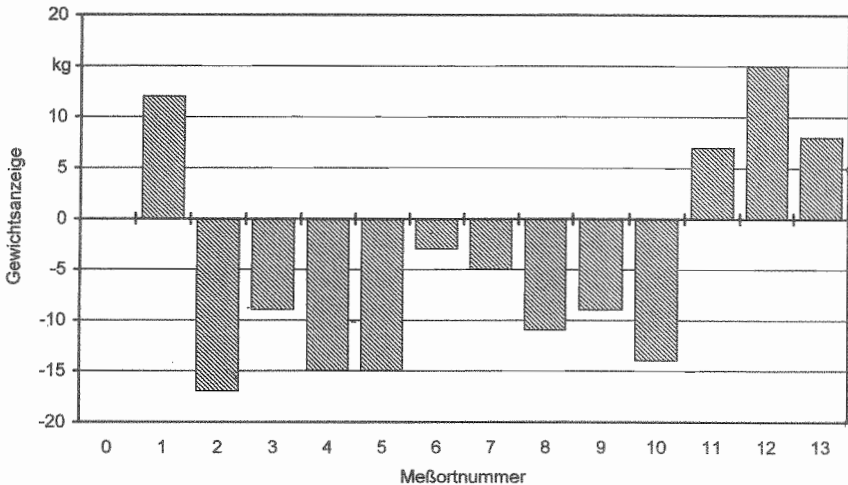


Abbildung 65: Gewichtsabweichungen vom Sollwert bei Messungen auf der Wiesenteststrecke (Messung bei Fahrzeugstillstand nach jeweils ca. 4 m Fahrt; Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung in Achsstummeln; n=1).

Die Differenzen waren bei den Meßreihen auf dieser Fahrbahn etwa viermal so groß, wie die auf der Asphaltstraße: Sie bewegten sich überwiegend in einer Bandbreite von etwa ± 15 kg.

6.3.1.8 Diskussion

Die Untersuchungsergebnisse der schwingungsfreien Einflüsse zeigen, daß je nach Meßverfahren die Gewichtsermittlung unbedeutend oder erheblich beeinträchtigt werden kann.

Verlagerungen der Zugöse im Zugmaul des FENDT-Schleppers führen mit der Biegespannungsmessung in der Deichsel zu Wägefehlern von bis zu etwa 25 kg. ROTTMEIER 1996 [145] konnte mit dem selben Meßverfahren und Sensoren bei seinem Feldversuch mit geringeren Fehlern messen. Die Ursache für diese Diskrepanz liegt vermutlich in der Durchführung von ROTTMEIERS Versuchen. Zwischen der Gewichtsmessung der Presse mit dem Ballen (Bruttowägung) und der Messung der leeren Presse (Tarawägung) zur Ermittlung des

Ballengewichtes durch Differenzbildung wurde das Gespann nicht bewegt. Dadurch konnten wohl Verlagerungen der Zugöse weitgehend verhindert werden.

Trotz der theoretischen Unabhängigkeit der Scherspannungsmessung von der untersuchten Zugösenverlagerung im Zugmaul sind bei diesem Verfahren Abweichungen von bis zu 15 kg zu verzeichnen. Hier liegt die Ursache in der ungünstigen Geometrie des Applikationskörpers: Der rechteckige Querschnitt der Deichsel, der etwa doppelt so breit wie hoch ist, eignet sich nicht besonders gut für die Applikation von DMS zur Scherspannungsmessung, da die Neutrallinie des Körpers schwer zu finden ist. Die Applikation muß auf der Neutrallinie (oft die Mittelachse des Applikationskörpers) erfolgen, damit die Scherspannung ohne Überlagerungen erfaßt werden kann [123]. Zum Ausschluß von Überlagerungen wäre ein Applikationskörperquerschnitt in Form eines Doppel-T ("I") bestens geeignet. Die Deichsel müßte dementsprechend modifiziert werden.

Keinerlei Beeinträchtigungen durch die Zugösenverlagerung treten bei der Messung mit der in der Anhängenkupplung integrierten Wägezelle auf. Der technische Aufwand zur Installation ist aber höher als bei der Direktapplikation von Dehnungsmeßstreifen.

Vom Prinzip her ist die Scherspannungsmessung auch unempfindlich gegenüber Kräften, die entlang der Längsachse des Applikationskörpers wirken [123]. Die Zugkraft an der Deichsel ist eine derartige Kraft, aber sie führte trotzdem zu Fehlern bei der Wägung (ca. 30 kg bei 5000 N). Als Ursache kommt eine ungünstige Verteilung der Zugspannung über den Querschnitt des Applikationskörpers in Frage. Auch das Auftreten von Drehmomenten an der Zugöse muß aufgrund des Versuchsaufbaus in Erwägung gezogen werden. Unbeeinflußt von der Zugkraft blieb dagegen die Gewichtsbestimmung mit der Wägezelle.

Wechselnde Winkel zwischen den Fahrzeuglängsachsen, die z.B. bei Kurvenfahrten vorkommen, haben auf die Lastermittlung mit der Wägezelle in der Deichsel keinen Einfluß. Da anzunehmen ist, daß bei den Versuchen mit unterschiedlichen Winkeln auch unterschiedliche Biege- und Drehmomente an der Deichsel und am Zugmaul auftraten, kann davon ausgegangen werden, daß die Wägung mit der Wägezelle auch von diesen beiden Größen weitgehend unbeeinträchtigt bleibt.

Eine Veränderung der Reifenauflagefläche führte zu einer Verfälschung der Wägewerte um bis zu 25 kg; sie geht von der Gewichtsmessung an den beiden Achsstummeln aus. Es findet

eine Gewichtsverlagerung von einem Achsstummel zum anderen statt, diese müßte aber theoretisch wägenneutral sein: Durch das Verschieben der Plattform wandert der Krafteinleitungspunkt in die selbe Richtung mit. Vergrößert sich dadurch der Abstand zum Krafteinleitungspunkt am rechten Achsstummel, so nimmt das Gewicht am linken Achsstummel um einen bestimmten Betrag ab und steigt um denselben Betrag an der rechten Fahrzeugseite [88, 99]. Verkleinert sich der Abstand, so läuft die Verlagerung in die entgegengesetzte Richtung. In den eigenen Untersuchungen hoben sich Ab- und Zunahme nicht gegenseitig auf. Als Ursache ist hier eine Beeinträchtigung der Scherspannungsmessung durch Biegemomente zu nennen. Durch eine Veränderung der Reifenauflagefläche wandert die Krafteinleitung von der Reifenmitte weg, wodurch sich die Biegespannung im Achsstummel ändert [123]. Die in der Presse applizierten DMS zur Scherspannungsmessung registrieren ungewollterweise dieses Biegemoment und führen zu den Meßfehlern. Eine Reduzierung des Biegespannungseinflusses wäre durch eine verbesserte DMS-Applikation möglich, z.B. die Anbringung des DMS exakt in der Neutrallinie. Da diese nicht immer mit der Mittellinie des Applikationskörpers identisch ist, muß sie zuerst mit z.T. aufwendigen Verfahren gefunden werden [144]. Eine Verbesserung würde auch eine möglichst kleine Applikationsfläche mit sich bringen. Denkbar wäre auch, die Scherspannungsmessung durch eine Doppelbiegespannungsermittlung ("Differenzmessung") zu ersetzen [43]: Durch eng aneinander applizierte DMS zur Biegespannungsmessung könnte zwischen beiden Applikationen ein Differenzsignal ermittelt werden, das unabhängig vom Krafteinleitungspunkt und auch von Hebelarmeinflüssen wäre. Nachteilig ist aber, daß diese Applikation mehr Platz benötigt, der z.B. in Achsstummeln nicht immer zur Verfügung steht. Außerdem ist die Amplitude des Ausgangssignals relativ niedrig; eine entsprechend aufwendige Signalverstärkung wäre deshalb erforderlich. Die Verwendung schmalerer Reifen wäre eine weitere Maßnahme zur Einflußreduzierung. Dies ist aber im Hinblick auf eine höhere Bodenverdichtung kritisch zu beurteilen.

Eine Gesamtbewertung der Einflußkraft des Rollwiderstandes auf die Gewichtsermittlung war zwar nicht möglich, aber mit der Steigung der Reifenauflagefläche konnte eine Rollwiderstandsänderung bis zu einem gewissen Grad simuliert werden. Eine Zunahme der Steigung, die einer Erhöhung des Rollwiderstandes gleichzusetzen ist, führt in der Summe zu einem Anstieg des Wägewertes. Infolge der Erhöhung der Flächensteigung wird die Zugkraft an der Deichsel größer und es kommt wie bereits erläutert zu einer Gewichtsverlagerung von der Achse zur Deichsel. Diese ist aber, wie die Zugkraftversuche mit der Wägezelle gezeigt haben, wägenneutral. Der Wägefehler ergibt sich somit allein aus zu hoch gemessenen Werten

in den beiden Achsstummeln. Dies bestätigt auch folgende Beispielsberechnung: Mit einer Masse der Rundballenpresse von $m = 1900 \text{ kg}$ (incl. Meßtechnik und Netzrolle) und der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ ergibt sich mit

$$F_{GA} = m \cdot g \quad (9)$$

eine Gewichtskraft von $F_{GA} = 18639 \text{ N}$ für die Presse. Bei einem Steigungswinkel von $\beta = 20^\circ$ und der Formel

$$F_Z = \sin(\beta) \cdot \cos(\beta) \cdot F_{GA} \quad (10)$$

die angewendet wird, wenn die Presse auf einer schiefen und der Schlepper auf einer horizontalen Ebene steht, errechnet sich für die Deichsel eine Zugkraft $F_Z = 5991 \text{ N}$. Diese führt mit dem Regressionsmodell y_A für die Anhängerkupplung aus Abbildung 58 zu einem Wägewert von 88,7 kg. Mit Gleichung y_A für die Anhängerkupplung aus Abbildung 62 ergibt sich bei einem Steigungswinkel von 20° eine Wägewert von 91,8 kg. Die Ähnlichkeit beider Werte bestätigt, daß der Wägewert an der Deichsel bei einer Steigungsänderung der Reifenauftragfläche durch die Zugkrafteerhöhung hervorgerufen wird und der Grund für die Wägefeler an den Achsstummeln zu suchen ist. Die Hauptursache für die Abweichung ist eine Veränderung des Krafteinleitungspunktes, die sich negativ auf die Scherspannungsmessung auswirkt. Als Maßnahmen zur Verringerung dieses Fehlers kommen die im vorausgehenden Absatz vorgestellten Möglichkeiten in Frage. Aufgrund dieser Abhängigkeiten der DMS-Applikation in den Achsstummeln, wären ausführliche Untersuchungen auf einem Prüfstand zum Rollwiderstand und zu Torsionen bzw. Drehmomenten an den Rädern wünschenswert.

Wie erwartet, führt die Abstützung der Pick-up über die Stützräder zu erheblichen Beeinträchtigungen der Gewichtsermittlung. Werden die Stützräder entfernt, so ist aufgrund der fehlenden Tiefenführung mit größeren Beeinträchtigungen durch Bodenkontakt der Pick-up-Zinken zu rechnen. Eine Tiefenführung könnte neben der mechanischen, kontaktgebundenen Steuerung aber auch berührunglos, z.B. mit Ultraschallsensoren, erfolgen [126, 177].

Die Wägefeler, die bei den Messungen bei Fahrzeugstillstand auf der Asphaltstrecke und auf der Wiese ermittelt wurden, können als Anhaltspunkt für die Gesamteinflußkraft der schwingungsfreien Einflüsse im praktischen Einsatz angesehen werden. Es zeigt sich sehr deutlich

der Einfluß der Fahrbahn: bei der Wiese mit relativ unebener Oberfläche sind die Wägefehler wesentlich größer als auf der asphaltierten Straße. Da durch den Einsatz der Wägezelle die Einflüsse an der Deichsel so gut wie ausgeschlossen waren und die Pick-up keinen Bodenkontakt hatte, liegt die Ursache der Abweichungen überwiegend in der Fahrbahnoberfläche bzw. an der Reifenaufgabe und am Rollwiderstand. Diese Faktoren führen zu Veränderungen des Kräfteinleitungspunktes bzw. des Hebelarmes und bewirken Biegespannungen, die die Scherspannungsmessung in den Achsstummeln stören. Durch die Anwendung der Scherspannungsmessung an Stelle der Biegespannungsmessung wurde der Einfluß der Hebelarmveränderungen bereits erheblich reduziert, eine weitere Verbesserung wäre mit den bereits erläuterten Methoden möglich.

Schließlich stellt sich die Frage, inwieweit das Gewichtsermittlungsverfahren mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung und der Scherspannungsmessung in den Achsstummeln durch beschleunigungsbedingte Einflüsse, d.h. durch Störschwingungen, beeinträchtigt wird.

6.3.2 Einflüsse der Schwingungen

Weitere Einflüsse gehen beim Betrieb von Bodenunebenheiten und von rotierenden und translatierenden Teilen der laufenden Presse aus. Sie verursachen Beschleunigungen, die Störschwingungen bewirken und auf die Gewichtsermittlungssensoren einwirken. Die daraus resultierenden Gewichtssignale und Ausgleichsmöglichkeiten sollen nachfolgend erörtert werden.

6.3.2.1 Charakterisierung der Gewichtssignale

Die beim Betrieb der Presse auftretenden Abweichungen, die durch Störschwingungen hervorgerufen werden, sind wesentlich größer als die Fehler, die von schwingungsfreien Faktoren verursacht werden (Abb. 66).

Dargestellt ist das Gesamtgewichtssignal beim Anfertigen eines Ballens mit der Presse und dem FENDT-Schlepper. Zwischen $t = 0$ und $t = 10$ s stand das Gespann still, der Schlepper lief im Leerlauf, die Zapfwelle war ausgeschaltet. In diesem Zeitbereich zeigt das Gewichtssignal bereits Abweichungen von etwa ± 20 kg vom Sollwert, Extremwerte reichen bis zu

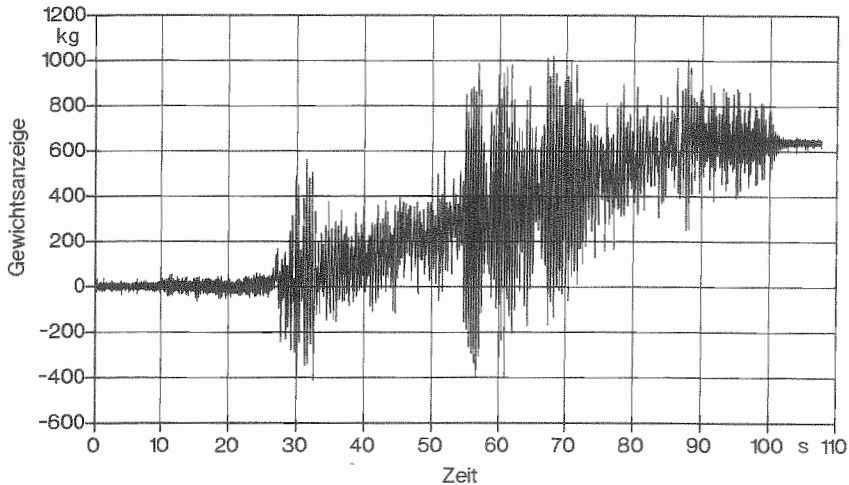


Abbildung 66: Gesamtgewichtssignal beim Pressen eines Ballens (Wägezelle in Anhängerkupplung, Scherspannungsmessung im linken und rechten Achsstummel).

± 40 kg. Wird nach 10 s die Zapfwelle eingeschaltet, dann nehmen die Abweichungen noch weiter zu. Sobald der Schlepper mit der Presse losfährt (nach 26 s) und Gut aufgenommen wird, steigen sie in Extremfällen auf bis ± 700 kg. Dabei ist der Beitrag zu den Abweichungen von der Anhängerkupplung und von den Achsstummeln unterschiedlich hoch (Abb. 67).

Bei laufendem Motor und stehendem Fahrzeug sind an der Anhängerkupplung die Abweichungen fast doppelt so groß wie am rechten Achsstummel. Wird die Zapfwelle eingeschaltet, so nimmt die Fehlerstreuung an Anhängerkupplung und Achsstummel zu, wobei die Abweichungen an der Anhängerkupplung immer noch größer sind als am Achsstummel. Gleichzeitig erhöht sich aufgrund des von der Gelenkwelle übertragenen Drehmoments das Signalniveau am rechten Achsstummel, am linken Achsstummel (nicht dargestellt) sinkt das Niveau. Durch das Fahren steigen die Schwankungen gegenüber den Abweichungen bei eingeschalteter Zapfwelle an der Anhängerkupplung auf etwa das fünffache, am Achsstummel bis zum zwanzigfachen. Bei diesen Ergebnissen und auch bei den folgenden ist zu bedenken, daß der Anteil am Leergewicht der Presse und am Ballengewicht - und damit der schwingenden Masse - an der Deichsel geringer ist als am Achsstummel.

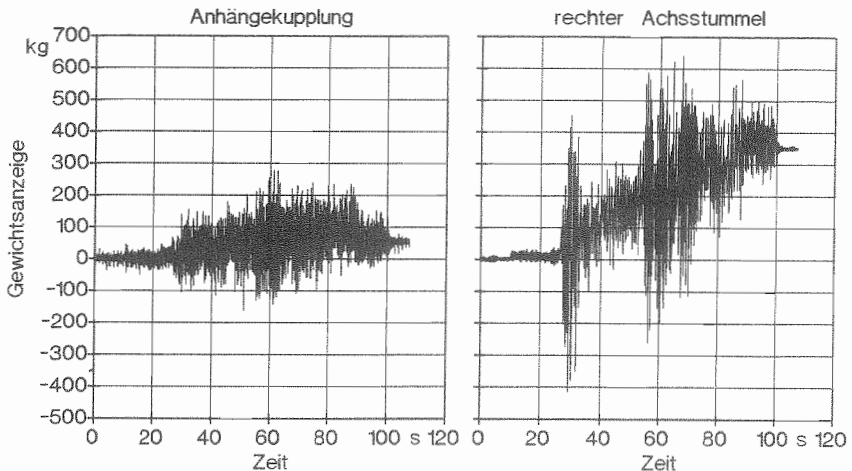


Abbildung 67: Gewichtssignal gemessen an der Anhängerkupplung und am rechten Achsstummel beim Pressen eines Ballens.

Werden die Gewichtssignale der drei Meßstellen - Anhängerkupplung, linker und rechter Achsstummel - mit Hilfe der FFT in den Frequenzbereich überführt, so zeigen sich deutliche Unterschiede. Das FFT-Ergebnis der Meßwerte der Anhängerkupplung bei unterschiedlichen Betriebsparametern zeigt Abbildung 68.

Bei laufendem Motor, ausgeschalteter Zapfwelle und stehendem Fahrzeug sind die Amplitudenhöhen der auftauchenden Frequenzen noch relativ niedrig, es treten aber Frequenzen im gesamten analysierten Bereich von 0 bis 100 Hz auf. Sobald die Zapfwelle eingeschaltet wird, steigen die Amplituden einzelner Schwingungen stark an, wobei Spitzenwerte von etwa 10 und 15 kg erreicht werden. Die dominanten Schwingungen liegen vor allem im Bereich von knapp über 0 Hz bis etwa 25 Hz, wobei der Hauptbereich bei etwa 10 Hz endet.

Wird das Fahrzeug bei ausgeschalteter Zapfwelle in Bewegung gesetzt, so zeigen sich vor allem Schwingungen im Bereich unter 10 Hz mit Maximalamplituden von bis zu ca. 30 kg. Bei 0 Hz liegt eine Amplitude mit etwa 6 kg vor. Bei Zuschaltung der Zapfwelle erweitert sich der relevante Frequenzbereich auf etwa 25 Hz, der maximale Wert ist nicht mehr so hoch. Auch hier ist bei 0 Hz ein Amplitudenwert von etwa 6 kg festzustellen.

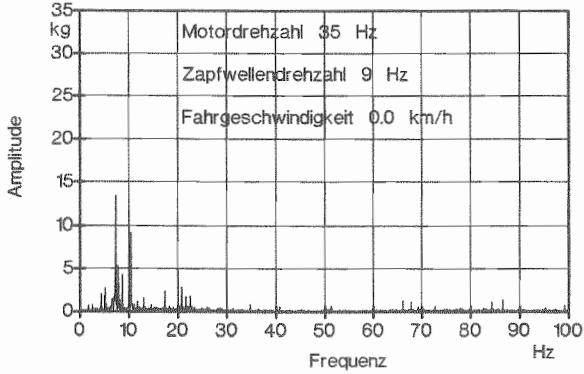
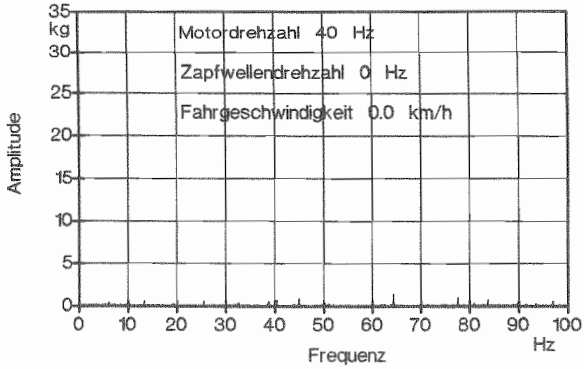
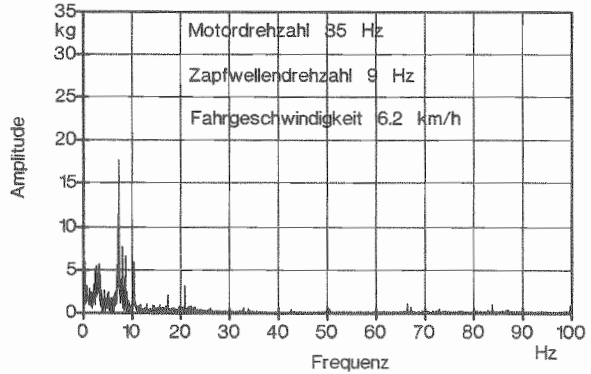
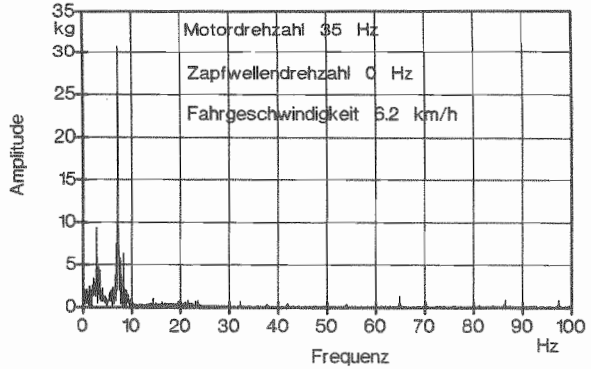


Abbildung 68: Frequenzspektrum des an der Anhängerkupplung gemessenen Gewichtssignals bei unterschiedlichen Betriebsparametern.

Andere Frequenzspektren zeigen die Ergebnisse der FFT der Gewichtssignale, die in den Achsstummeln gemessen wurden (Abb. 69).

Bei laufendem Motor sind in den vom rechten Achsstummel stammenden Gewichtssignal kaum Schwingungen mit größeren Amplituden zu erkennen, nach Zuschalten der Zapfwelle liegt der höchste Amplitudenwert mit etwa 9 kg bei 4,5 Hz, alle anderen liegen unter 3 kg. Ist bei ausgeschalteter Zapfwelle die Presse in Bewegung, so zeigen sich Schwingungen vor allem im Bereich von 0 bis 5 Hz, ihre Amplituden reichen fast bis an 40 kg heran. Nach Zuschalten der Zapfwelle überschreitet die Schwingung mit einer Frequenz von knapp 2 Hz eine Amplitudenhöhe von 50 kg. Bei beiden Varianten mit fahrendem Gespann sind mit ca. 25 kg auch relativ hohe Amplituden bei 0 Hz festzustellen.

Die für den rechten Achsstummel vorgestellten Ergebnisse gelten in ähnlicher Weise auch für den linken Achsstummel.

6.3.2.2 Filter- und Glättungsverfahren

Als Basis zur Auswahl von Filter- und Glättungsverfahren diente die Zusammenfassung der wesentlichen Eigenschaften der untersuchten Gewichtssignale in Tabelle 20.

Tabelle 20: Wichtige Eigenschaften der gemessenen Gewichtssignale an der Anhängerkupplung und den Achsstummeln.

Eigenschaft	Anhängerkupplung	Achsstummel
Maximalamplituden der Schwingungen	niedriger	höher
Amplitudenhöhen bei Zapfwellenbetrieb	höher	niedriger
Amplitudenhöhen bei Fahrzeugbewegung	niedriger	höher
Hauptsächlicher Frequenzbereich	0 - 10 Hz	0 - 5 Hz
Anteil nicht periodisch erzeugter Schwingungen		
bei Zapfwellenbetrieb	minimal	minimal
bei Fahrzeugbewegung	niedriger	höher

Die aufgeführten nicht periodisch erregten Schwingungen leiten sich vom Amplitudenwert im Frequenzspektrum bei 0 Hz ab.

Ausgehend von der Eigenschaftenaufzählung wurde zur Ausblendung der Störschwingungen ein rekursiver IIR-Tiefpaßfilter ("infinite impulse response") angewendet, bei dem im

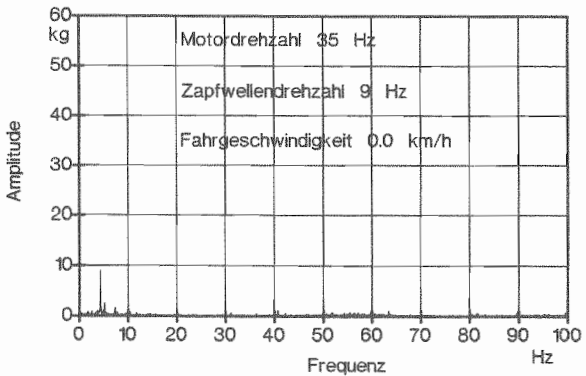
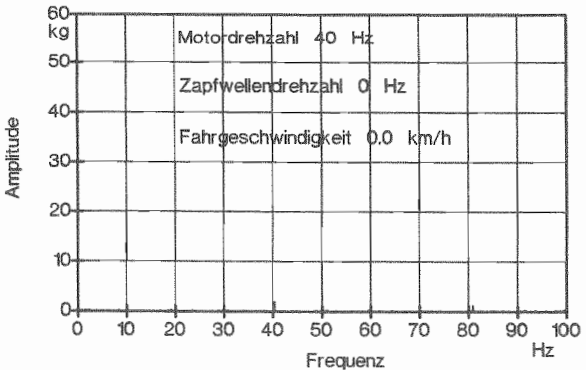
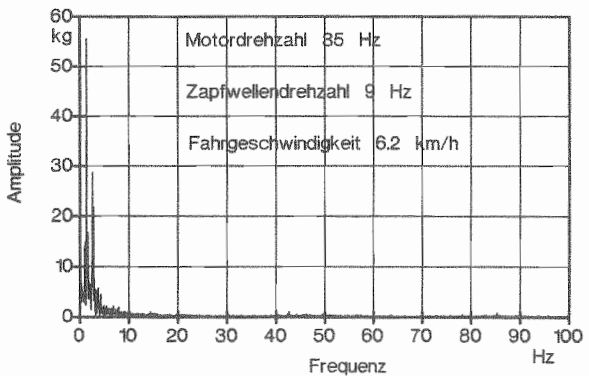
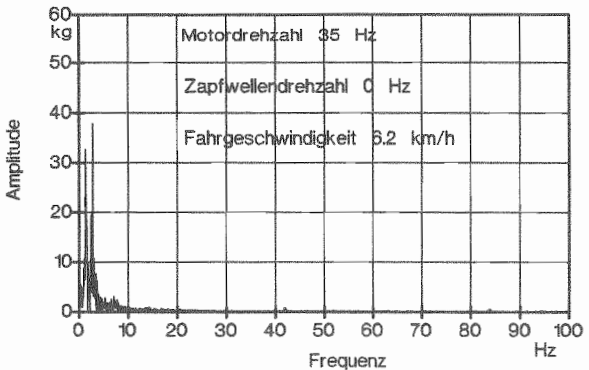


Abbildung 69: Frequenzspektrum des am rechten Achsstummel gemessenen Gewichtssignals bei unterschiedlichen Betriebsparametern.

Vergleich zum nichtrekursiven FIR-Filtern ("finite impulse response") zusätzlich zu den Werten des Eingangssignals auch die zurückliegenden Werte des Ausgangssignals in das neue aktuelle Ausgangssignal mit eingehen [160]. Als Tiefpaßfiltertyp wurde der *Butterworth*-Filter mit einem Filtergrad von zwei gewählt. Dieser Filtertyp zeichnet sich durch einen maximal flachen Amplitudengang im Durchlaßbereich aus [111]. Tiefpaßfilter lassen nur Schwingungen mit Frequenzen durch, die unterhalb einer vorgegebenen Grenzfrequenz liegen. Da selbst die Signale ohne erkennbare Anteile nicht periodisch erregter Schwingungen sehr niederfrequente Schwingungen aufweisen, wurde eine Grenzfrequenz f_g von 0,1 Hz gewählt.

Aufgrund der z.T. sehr hohen Amplitudenwerte bei 0 Hz, ist die Verwendung von Tiefpaßfiltern kritisch zu betrachten, weil sie keine nicht periodisch erregten Schwingungen herausfiltern können. Deshalb wurde als Alternative die Glättung mit Splines (Spline-Approximation) ausgewählt. Bei diesem mathematischen Verfahren wird die gesamte Originalmeßkurve durch eine Vielzahl von Einzelfunktionen ersetzt [160]. Die Einzelfunktionen sind so berechnet, daß an den Übergangsstellen keine Steigungsunterschiede auftreten. Die entstehende Spline-Gesamtfunktion ist zweimal stetig differenzierbar, wodurch extrem glatte Kurvenverläufe entstehen. Durch die Wahl des Wichtungsfaktors bei der Splineberechnung wird festgelegt, wie stark ausgeglichen wird: Geht er gegen unendlich, so erfolgt keine Glättung (der Spline läuft durch alle Originalmeßwerte), geht er gegen 0, entsteht eine Gerade, die der Regressionsgeraden entspricht [160].

Da es für die Bestimmung des Wichtungsfaktors WF keine exakten mathematischen Vorschriften gibt, wurden Ergebnisse von Tiefpaßfilterungen als Orientierungshilfe genommen. Abbildung 70 zeigt beispielhaft eine Ausgangskurve und die Resultate.

Rohgewichtssignale, ermittelt durch Aufsummierung der Werte von der Anhängelkupplung und den beiden Achsstummeln bei einer Messung mit Fahrzeugstillstand und eingeschalteter Zapfwelle, wurden mit einem Tiefpaßfilter ($f_g = 0,1$ Hz) bereinigt. Die Originalmeßkurve wies keine bedeutenden nicht periodisch erregten Schwingungen auf. Die Ergebniskurve zeigt nur noch Abweichungen von ca. $\pm 0,5$ kg absolut bzw. 1 % relativ. Für einen Spline, der ähnlich wenig streut, ist ein Wichtungsfaktor von 0,005 erforderlich. Das Kurvenende des Splines steigt zwar deutlich über die Kurve der Tiefpaßfilterung, dies ist aber nicht außergewöhnlich, weil die Originalmeßkurve auf einem hohen Niveau endet. Im Gegensatz zum Ergebnis der Tiefpaßfilterung ist die Spline-Kurve extrem glatt.

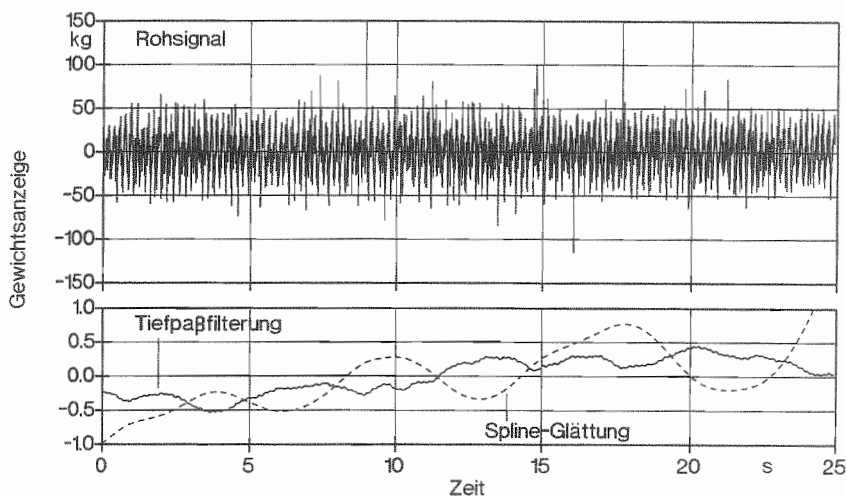


Abbildung 70: Gesamtsignal tiefpaßgefiltert und mit Spline geglättet (Fahrzeugstillstand, Motordrehzahl 40 Hz, Zapfwellendrehzahl 10 Hz, $f_g=0,1$ Hz, $WF=0,005$).

Fährt das Fahrzeug, kann durch die Tiefpaßfilterung keine so starke Reduzierung erzielt werden. Die ursprünglichen Abweichungen von ± 300 kg verringern sich auf $+5$ bis -10 kg absolut bzw. auf ca. 2 - 3 % relativ (Abb. 71).

Eine Spline-Glättung mit einem Wichtungsfaktor $WF = 0,005$ führt zu ähnlichen Resultaten wie ein Tiefpaßfilter. Anfangs- und Endbereich des Splines liegen deutlich über der Ergebniskurve der Tiefpaßfilterung, weil die Rohsignalkurve auf einem hohen Niveau beginnt und endet. Eine zusätzlich durchgeführte gleitende Mittelwertberechnung (Originalmeßpunkt wird ersetzt durch den Mittelwert, der aus dem aktuellen Meßwert und $n/2$ vorausgehenden und $n/2$ nachfolgenden Nachbarwerten errechnet wird) mit $n = 1000$ Nachbarwerten führt zur geringsten Glättung.

6.3.2.3 Gewichts- und Beschleunigungswerte

Für eine Beurteilung der Korrelationen zwischen Gewichts- und Beschleunigungssignalen darf nicht zu stark geglättet werden. Deshalb wurde bei der Spline-Berechnung der Wichtungsfaktor auf 100000 angehoben. Zur Darstellung wurde aus dem gesamten Verlauf ein repräsentativer Ausschnitt ausgewählt. Die dargestellten Frequenzspektren beziehen sich auf den gesamten erfaßten Zeitraum.

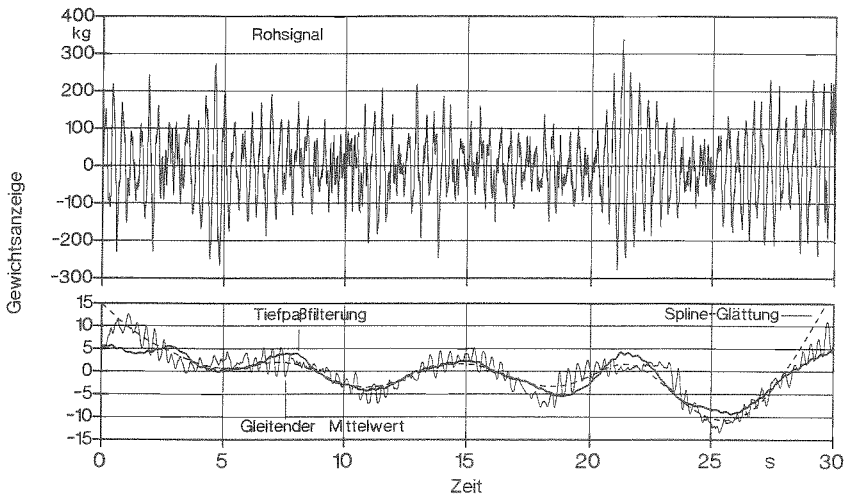


Abbildung 71: Roh- und geglättetes Gesamtgewichtssignal (Geschwindigkeit 6,2 km/h, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 9 Hz, Tiefpaßfilt. mit $f_g=0,1$ Hz, Spline mit $WF=0,005$, Gleit. Mittelwert mit $n=1000$ Werten).

Gewichts- und Beschleunigungssignal an der Anhängerkupplung/Deichsel: An dieser Meßstelle liegt zwischen dem Gewichts- und Beschleunigungssignal keine bedeutende Übereinstimmung vor (Abb. 72).

Bei stehendem Fahrzeug und eingeschalteter Zapfwelle sind weder zwischen den Verläufen noch zwischen den Ergebnissen der FFT-Analyse der beiden Signale größere Korrelationen zu verzeichnen. Während die Hauptfrequenzen des Gewichtssignals der Wägezelle in der Anhängerkupplung vor allem unterhalb von 30 Hz zu finden sind, liegen sie beim Beschleunigungssignal, das an der Deichsel (Sensorapplikationsort P1) gemessen wurde, in erster Linie über 30 Hz.

Bei ausgeschalteter Zapfwelle und Fahrt, zeichnen sich erste Zusammenhänge ab (Abb. 73).

Im Zeitbereich sind einige Abschnitte mit ähnlichem Kurvenverlauf zu erkennen, im Frequenzbereich sind gewisse gemeinsame Merkmale im Bereich von 0 bis zu etwa 10 Hz zu verzeichnen.

Das Einschalten der Zapfwelle führt zu einer Verringerung der Korrelationen zwischen beiden Signalen (Abb. 74).

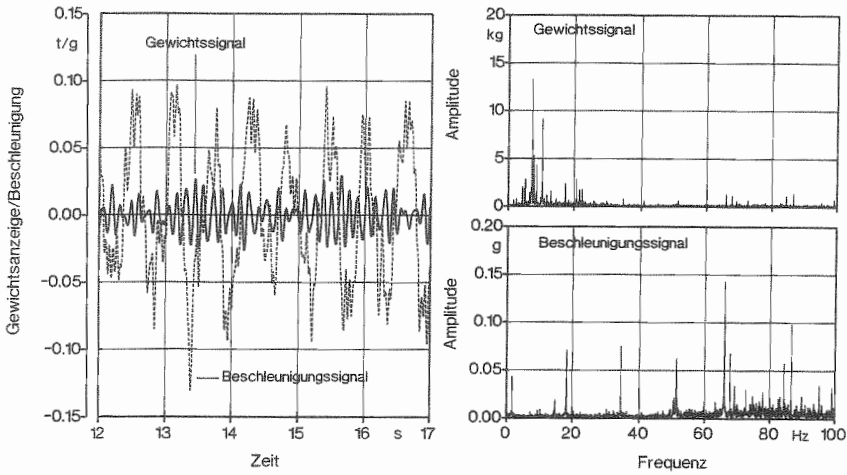


Abbildung 72: Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals an der Anhängerkupplung und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Fahrzeugstillstand, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 9 Hz).

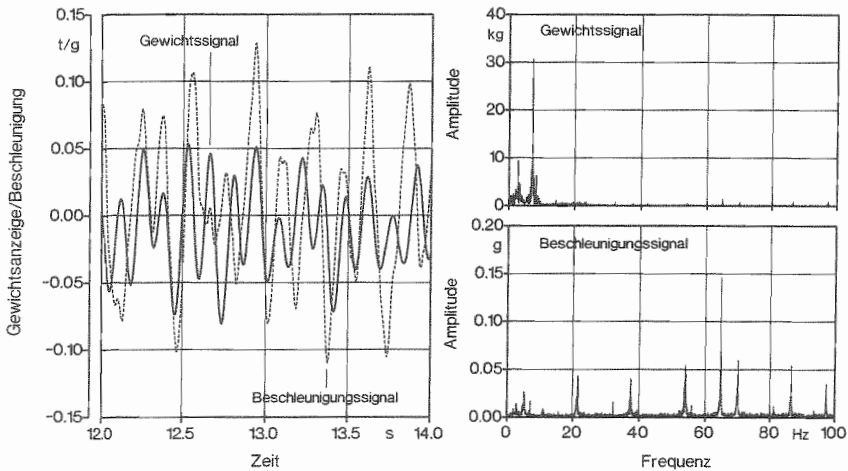


Abbildung 73: Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals an der Anhängerkupplung und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Geschwindigkeit 6,2 km/h, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).

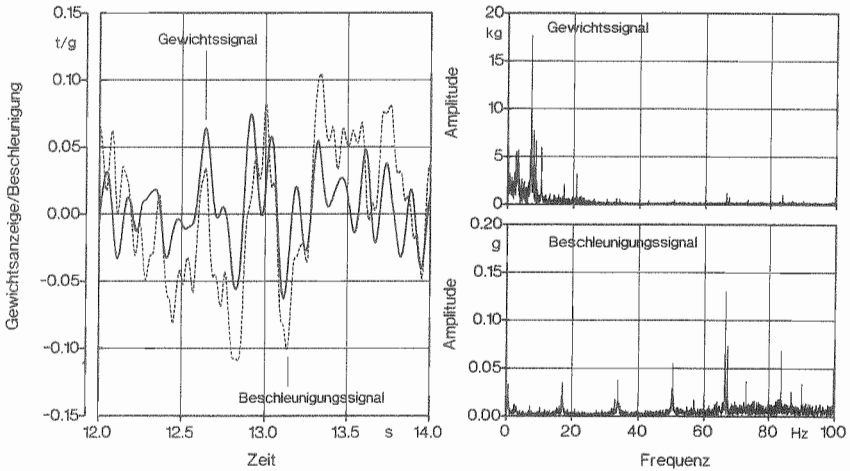


Abbildung 74: Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals an der Anhängerkupplung und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Geschwindigkeit 6,2 km/h, Motordrehzahl 35 Hz, Zapfwelldrehzahl 9 Hz).

Wird der FENDT-Schlepper durch den Unimog ersetzt, wodurch die Wägezelle nicht mehr einsetzbar ist und deshalb die Gewichtsermittlung über die Scherspannungsmessung erfolgen muß, so nimmt die Korrelation zwischen den Gewichts- und Beschleunigungssignalen deutlich zu (Abb. 75).

Der Beschleunigungssensor, der nach wie vor am selben Ort (P1) war, ermittelte Werte, die dem Kurvenlauf des Gewichtes z.T. sehr nahe kommen. Im Frequenzspektrum sind die Ähnlichkeiten vor allem im Bereich von 0 bis etwa 10 Hz ausgeprägt. Der Peak bei 67 Hz im Beschleunigungssignal ist auch im Gewichtssignal zu erkennen.

Gewichts- und Beschleunigungssignal an den Achsstummeln: Wesentlich stärkere Zusammenhänge sind bei den Signalen festzustellen, die an den Achsstummeln gemessen wurden (Abb. 76).

Die Darstellung enthält zugleich die Werte eines zweiten Beschleunigungssensors an einem anderen Ort in der Presse. Der Applikationsort P2 liegt dabei wesentlich näher am DMS im Achsstummel als P3 (siehe Abb. 50). Die Frequenzspektren der Gewichts- und Beschleunigungswerte beim Fahren mit ausgeschalteter Zapfwelle weisen eine große Ähnlichkeit auf. Der größte Unterschied liegt bei den Schwingungen im Bereich von 0 bis ca. 2 Hz: während

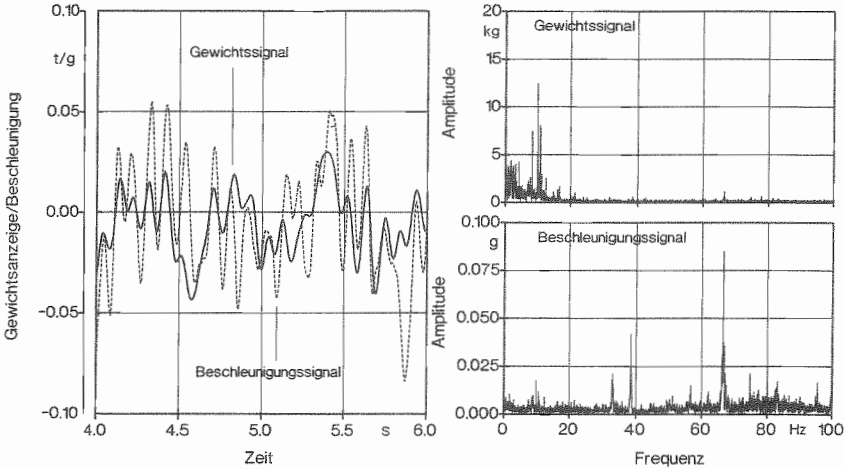


Abbildung 75: Verlauf und Frequenzspektrum des Gewichtssignals (Scherspannungsmessung) und des Beschleunigungssignals an der Deichsel (Fahrzeug: Unimog, Geschwindigkeit 6,5 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 8 Hz).

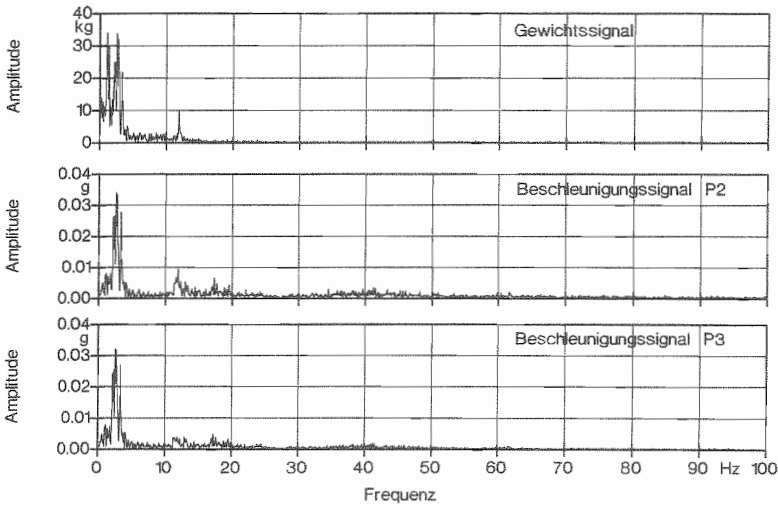


Abbildung 76: Frequenzspektrum des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).

die Amplituden der Schwingungen der Beschleunigungssignale von P2 und P3 relativ niedrig liegen, sind sie beim Gewichtssignal bedeutend höher. Die beiden Beschleunigungssignale unterscheiden sich im Frequenzspektrum nur geringfügig. Der auffälligste Unterschied ist der ausgeprägtere Peak bei 12 Hz im Spektrum von P2, wodurch P2 mit dem Gewichtssignal ein Gemeinsamkeitsmerkmal mehr aufweist als P3.

Diese Übereinstimmungen zeigen sich auch sehr gut im Zeitbereich (Abb. 77).

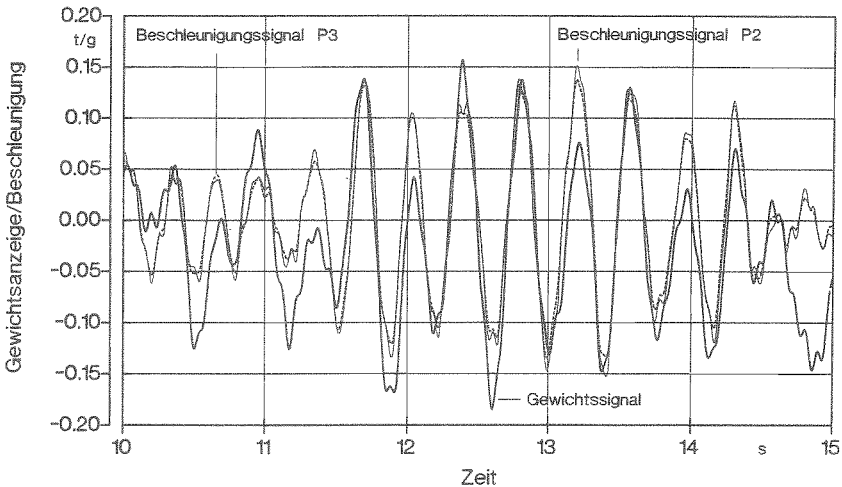


Abbildung 77: Verlauf des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwellendrehzahl 0 Hz).

Die Verläufe von P2 und P3 sind nahezu identisch. Ihre Phasen sind gleich. Kleinere Amplitudenunterschiede treten überwiegend bei lokalen Extremwerten mit Differenzen von maximal 0,015 g auf. Beim Vergleich mit dem Gewichtssignal liegen die größten Unterschiede ebenfalls bei den lokalen Minima und Maxima. Die größten Differenzen finden sich im dargestellten Beispiel zwischen 14,6 und 15 s: die Hauptgradienten der beiden Verläufe sind an dieser Stelle genau entgegengesetzt.

Wird der zweite Beschleunigungssensor auf einer anderen Stelle in der Presse (Ort P4) angebracht, wodurch sich der Abstand zum DMS und auch zum ersten Beschleunigungssensor vergrößert, so wirkt sich diese Versetzung bis zu einem gewissen Grad auf die Übereinstimmung der Gewichts- und Beschleunigungswerte aus (Abb. 78).

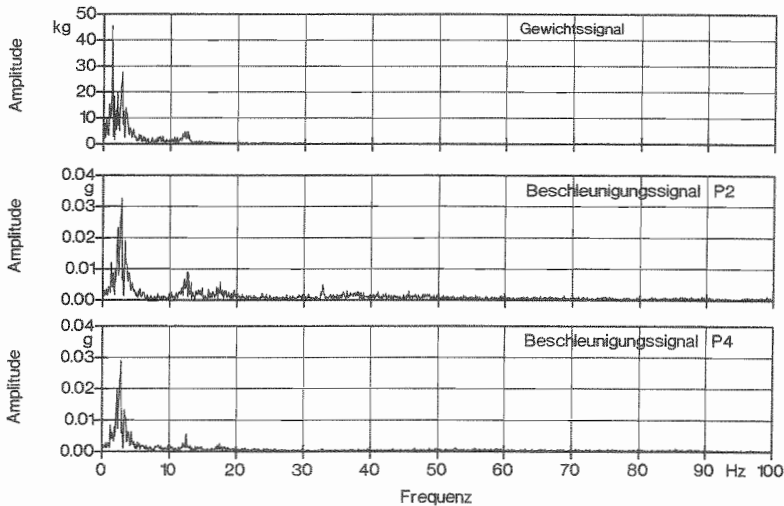


Abbildung 78: Frequenzspektrum des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P4 (Geschwindigkeit 8,1 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwellendrehzahl 0 Hz).

Die Unterschiede der Frequenzspektren zwischen den beiden Beschleunigungskurven sind etwas größer als im vorherigen Fall. Dies ist auch dem zeitlichen Verlauf der Signale zu entnehmen (Abb. 79).

Die Amplitudendifferenzen zwischen den beiden Beschleunigungskurven bei den lokalen Extremwerten sind mit bis zu 0,030 g doppelt so hoch. Welche der beiden Beschleunigungskurven dem Gewichtssignal näher kommt, läßt sich der Abbildung nicht entnehmen.

Erhebliche Auswirkungen hat die Inbetriebnahme der Presse durch Einschalten der Zapfwelle (zweiter Beschleunigungssensor wieder am Ort P3) (Abb. 80).

Die Amplituden der dominanten Schwingungen der Gewichts- und Beschleunigungssignale sind annähernd doppelt so hoch. Während das Frequenzspektrum des Gewichtssignals oberhalb 20 Hz nahezu leer ist, sind bei den Beschleunigungssignalen eine Vielzahl von Schwingungen zu erkennen. Dabei sind Amplituden der Schwingungen von P2 in diesem oberen Bereich deutlich höher als die von P3. Dieser Unterschied ist auch sehr gut im zeitlichen Signalverlauf ersichtlich (Abb. 81).

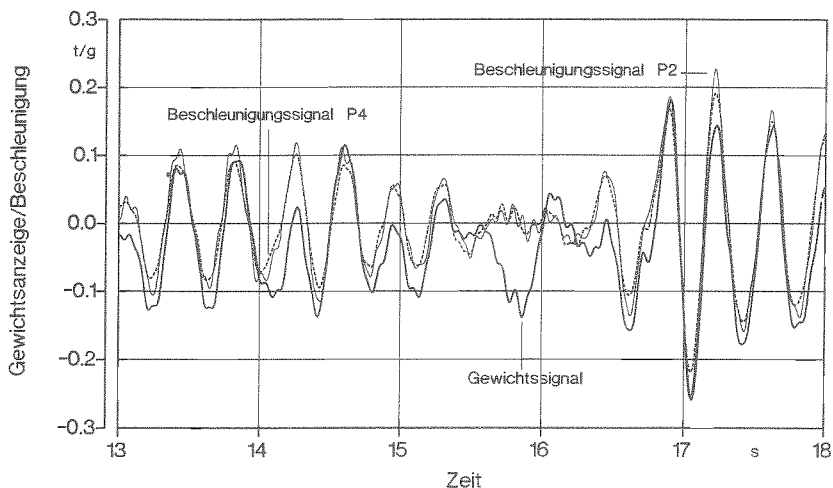


Abbildung 79: Verlauf des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P4 (Geschwindigkeit 8,1 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 0 Hz).

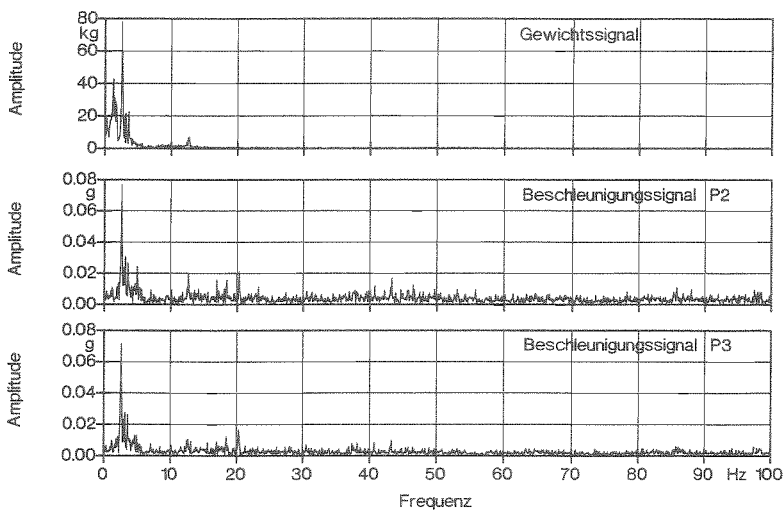


Abbildung 80: Frequenzspektrum des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 8 Hz).

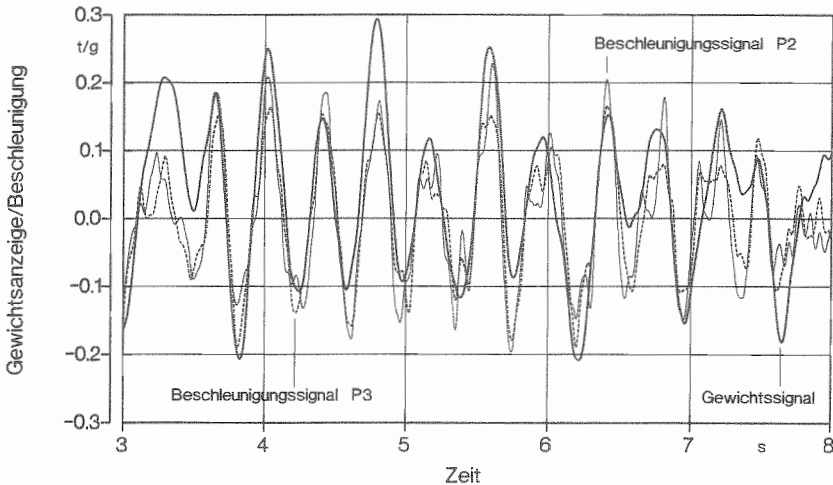


Abbildung 81: Verlauf des Gewichtssignals am linken Achsstummel und des Beschleunigungssignals an den Applikationsorten P2 und P3 (Geschwindigkeit 7,7 km/h, Motordrehzahl 33 Hz, Zapfwelldrehzahl 8 Hz).

Die Amplitudendifferenzen zwischen den Signalen von P2 und P3 sind teilweise größer als 0,1 g. Manchmal sind auch die Gradienten entgegengesetzt. Die Übereinstimmung mit dem Gewichtssignal wechselt: in einigen Abschnitten korrelieren Gewichtskurve und Beschleunigungskurve von P2 stärker als Gewichtsverlauf und die Werte von P3, in anderen Bereichen sind es die Gewichtskurve und die Beschleunigungen von P3.

6.3.2.4 Diskussion

Schwingungen können die Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse erheblich beeinträchtigen. Die induzierten Wägefehler sind mit mehreren 100 kg wesentlich größer als diejenigen, die von schwingungsfreien Einflußgrößen hervorgerufen werden. Die weitaus größeren Fehler gehen dabei im Betrieb der Presse von den Achsstummeln aus, die Abweichungen an der Anhängerkupplung schlagen mit etwa 1/3 zu Buche. Ursache der Störschwingungen sind sich bewegende Maschinenteile in der Presse und im Schlepper sowie Fahrbahnunebenheiten. Mit der Tiefpaßfilterung oder der Spline-Glättung können die Störanteile des Gewichtssignals größtenteils entfernt werden. Eine Verrechnung der Beschleunigungswerte zur Reduzierung der Fehler bei der dynamischen Wägung ist aufgrund der einwirkenden schwingungsfreien Störgrößen nicht sinnvoll.

Ein Vergleich der Frequenzspektren der auftretenden Schwingungen des Gewichtssignals an Deichsel und Achsstummel läßt einige größere Unterschiede erkennen. An der Deichsel ist das Spektrum breiter, die Hauptfrequenzen liegen zwischen 0 und 10 Hz, wobei aber auch Schwingungen mit Frequenzen - wenn auch mit geringeren Amplituden - zwischen 10 und 25 sowie zwischen 60 und 90 Hz auftreten. Bei diesen höherfrequenten Schwingungen kann von Überschwingungen (eventuell mit Resonanzen) ausgegangen werden. Am Achsstummel liegen die Schwingungen konzentriert zwischen 0 und 5 Hz, wobei an dieser Stelle auch die größeren Amplituden einzelner Schwingungen zu verzeichnen sind.

Die Ursachen für die Unterschiede zwischen Anhängerkupplung und Achsstummel liegen zum einen an der Schwingungsquelle, zum anderen am Weg der Schwingungen durch die Presse. An der Anhängerkupplung bzw. der Deichsel wirken die Schwingungen des Schleppermotors und der sich bewegenden Teile der Presse wesentlich stärker, da an dieser Stelle ein rein metallisches System vorliegt. In einem derartigen System ist die Dämpfung äußerst gering [189], Schwingungen des Schleppers und der Presse gelangen deshalb nahezu ungeschwächt an den Wägesensor. An den Achsstummeln dagegen wirkt die Bereifung dämpfend, Schwingungen werden gemindert oder fast gänzlich eliminiert. Umgekehrt wirken sich Bodenunebenheiten auf die Meßstellen in der Achse stärker aus als an der Anhängerkupplung, da die Wägesensoren im Bereich der Deichsel zwischen der Achse der Presse und des Schleppers liegen. Das verminderte Auftreten von Schwingungen zwischen den Achsen wird z.B. auch im Traktorenbau bei der Anordnung des Fahrersitzes genutzt.

Störungen, die auf nicht periodisch erregte Schwingungen zurückzuführen sind, treten an der Anhängerkupplung und an den Achsstummeln nur dann auf, wenn das Gespann fährt. Ihr Anteil fiel deutlich niedriger aus als bei den Untersuchungen von ROTTMEIER 1996 [145]. Eine Ursache könnten die unterschiedlichen Versuchsstrecken sein, eine andere die verschiedenen Meßwerterfassungsraten. Da ROTTMEIER mit sehr geringen Raten arbeitete, ist anzunehmen, daß periodisch erregte Schwingungen mit höheren Frequenzen nicht als solche erkannt wurden (Aliasing-Fehler).

Die Tiefpaßfilterung und die Spline-Glättung können einen Großteil der Störanteile ausblenden. Abweichungen von ± 300 kg wurden auf etwa $+5$ bis -10 kg bzw. 2 - 3 % vermindert. Dies ist eine erhebliche Genauigkeitssteigerung gegenüber den Werten von ROTTMEIER 1996 [145], die bei 10 - 15 % liegen.

Ein Grund für diese Verbesserung ist sicherlich die deutlich höhere Aufzeichnungsrate von 200 Hz gegenüber 18 Hz: Der tatsächliche Signalverlauf wird wirklichkeitsgetreuer erfaßt, Aliasing-Fehler werden vermieden und der mit 18 Hz fälschlicherweise zu hoch ermittelte Anteil nicht periodischer Schwingungen geht zurück. Der in den eigenen Meßwerten noch vorhandene Anteil an nicht periodisch erregten Schwingungen hat offensichtlich keine allzu großen Auswirkungen, da die Tiefpaßfilterung zu ähnlichen Resultaten führt wie die Spline-Glättung, die von ihnen nicht beeinträchtigt wird.

Der zweite Grund für die geringeren Wägefehler ist die Wahl einer niedrigeren Grenzfrequenz f_g bzw. die Anwendung eines entsprechenden Wichtungsfaktors. In den eigenen Arbeiten wurde die Grenzfrequenz auf 0,1 Hz gesetzt, bei ROTTMEIER war $f_g = 0,5$ Hz. Bei den bereits erwähnten Untersuchungen von CAMPPELL et al. 1994 [51] betrug sie 0,3 Hz, wobei aber die Aufzeichnungsrate mit 10 Hz relativ niedrig lag. Aussagekräftige Gründe für die Wahl der jeweiligen Grenzfrequenz und ob dadurch intolerable Verluste an Nutzinformation im Signal zustande kamen, werden nicht genannt. Inwieweit die niedrige Grenzfrequenz von 0,1 Hz zu Informationsverlusten führen kann, soll in einem späteren Kapitel (6.3.3.3) erörtert werden.

Bemerkenswert ist, daß nach dem Filtereinsatz oder der Splineglättung die verbleibenden Abweichungen vom Sollwert innerhalb der Streuweite liegen, die bei der Testfahrt auf der Wiese (mit Gewichtsmessung bei Fahrzeugstillstand) ermittelt wurde (siehe Abb. 65). Dies legt den Schluß nahe, daß durch die in der vorliegenden Arbeit eingesetzten Bereinigungsverfahren die schwingenden Störanteile nahezu vollständig eliminiert wurden und die noch vorhandenen Abweichungen auf schwingungsfreie Einflüsse wie Reifenauflagefläche oder Rollwiderstand zurückzuführen sind. Da die Wägezelle in der Anhängerkupplung von ihnen nicht beeinträchtigt wird, kommen die Fehler überwiegend von den Achsstummeln. Daß die schwingungsfreien Einflüsse einen gewichtigen Einfluß bei der Versuchsfahrt auf der Wiesen-teststrecke hatten, deren Ergebnisse in Abbildung 71 gezeigt sind, veranschaulicht eine lineare Regressionsberechnung für die Rohgewichtswerte. Sie führt für diese Fahrt, bei der das Gewicht konstant war, zu der Gleichung

$$W = -0,26 \text{ kg s}^{-1} * t + 3,84 \text{ kg} \quad (11)$$

Auf Basis dieser Gleichung folgt, daß das gemessene Gewicht W während der Aufzeichnungszeit ($t = 30$ s) um knapp 4 kg zurückging.

Da diese schwingungsfreien Einflüsse zwar auf Wägesensoren in den Achsstummeln und nicht auf die Beschleunigungssensoren wirken, sind sichere Aussagen zu Korrelationen zwischen Gewichts- und Beschleunigungssignalen nur eingeschränkt möglich. Einige Zusammenhänge wurden aber doch sehr deutlich:

1. An den Achsstummeln weist der Verlauf der Gewichts- und Beschleunigungssignale eine wesentlich höhere Korrelation auf als an der Anhängerkupplung bzw. Deichsel.
2. Der Applikationsort des Beschleunigungssensors hat einen signifikanten Einfluß auf die Höhe der Korrelation.

Die Signale der Wägezelle in der Anhängerkupplung und des Beschleunigungssensors auf der Deichsel zeigen keine großen Zusammenhänge, wobei beim Fahren etwas mehr Gemeinsamkeiten zu verzeichnen sind als beim Zapfwellenbetrieb. Höhere Korrelationen treten zu Tage, wenn beide Meßgrößen in der Deichsel ermittelt werden: Wie der Versuch mit der Scherspannungsmessung in der Deichsel und die Messung der Beschleunigung nur wenige Zentimeter vom DMS entfernt gezeigt hat, nimmt der Anteil der Abschnitte mit ähnlichem Kurvenverlauf durch die örtliche Nähe zu. Einen Beitrag zur höheren Korrelation leistet sicherlich auch das Fehlen der losen Verbindung von Zugmaul und Zugöse zwischen den beiden Sensoren.

Die Korrelation zwischen den ermittelten Gewichts- und Beschleunigungssignalen ist an den Achsstummeln deutlich höher als an der Deichsel. Bei Fahrten mit ausgeschalteter Zapfwelle ist eine höhere Übereinstimmung zu erkennen als bei Fahrten mit eingeschalteter Zapfwelle. Der Vergleich der Signale der beiden Beschleunigungssensoren untereinander und mit den Gewichtssignalen läßt erkennen, daß auch an der Achse der Applikationsort einen nicht unerheblichen Einfluß auf einen ähnlichen Verlauf der Gewichts- und Beschleunigungswerte hat. Dieser Zusammenhang wird vor allem nach dem Zuschalten der Zapfwelle verdeutlicht. Die beiden Beschleunigungssensoren, die nur wenige Zentimeter auseinander sitzen, unterscheiden sich in ihren Werten z.T. um mehr als 0,1 g. Jeder Beschleunigungsmesser erfaßt also andere Beschleunigungen; und diese unterscheiden sich wiederum von denen, die auf den Dehnungsmeßstreifen wirken. Entscheidend ist nicht nur der Abstand zwischen den Sensoren, sondern auch der Ort bzw. das Bauteil auf dem sie sitzen, denn beim Übergang von einem Bauteil zum anderen können Schwingungen mehr oder weniger stark gedämpft werden [189].

Diese Folgerungen unterscheiden sich von den Aussagen von ROTTMEIER 1996 [145], der zwischen Applikationsort und Signalübereinstimmung keine so deutliche Abhängigkeit feststellen konnte. Seine Ergebnisse beruhen aber auf dem Vergleich des Gesamtgewichtes mit dem Beschleunigungssignal und dies nur bei einer Aufzeichnungsrate von 18 Hz.

Mit den gemessenen Beschleunigungswerten von Deichsel und Achse ist gegenwärtig keine befriedigende Bereinigung der Gewichtssignale möglich, die Signalunterschiede sind noch zu groß. Die eigenen Ergebnisse deuten aber darauf hin, daß eine Korrektur der Gewichtswerte mit der Beschleunigungsinformation nur erfolgversprechend sein kann, wenn der Gewichts- und der Beschleunigungssensor am selben Ort sitzen. Nur so wirken auf beide die selben Schwingungen ein. Dazu wäre ein Meßelement erforderlich, das sowohl einen Gewichts- als auch einen Beschleunigungssensor beinhaltet. Mit Wägezellen wäre dies relativ einfach zu realisieren. Bei der Direktapplikation von Dehnungsmeßstreifen ist dies nicht möglich. In diesem Fall müßte der Beschleunigungssensor so nah wie möglich an den DMS angebracht werden. Zu berücksichtigen wäre auch, daß beide Sensoren den selben Frequenzbereich erfassen. Die Obergrenze setzt hierbei vor allem der DMS, der über die Eigenfrequenz hinausgehende Schwingungen nicht mehr registrieren kann [3].

6.3.3 Genauigkeit der dynamischen Gewichts- und Durchsatzermittlung

6.3.3.1 Wägefehler beim Lückenschwad

Mit Hilfe des Lückenschwades wurde die Genauigkeit der dynamischen Gewichtsermittlung mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung, der Scherspannungsmessung in den Achsstummeln und der Signalbereinigung auf Basis der Tiefpaßfilterung und der Spline-Glättung überprüft.

Die statische Wägung des vom Lückenschwad gewonnenen Ballens in der Presse ergab 461 kg; mit der Kranwaage wurde genau der gleiche Wert festgestellt. Die Gewichtskurve der dynamischen Wägung, als Summe der Werte von den drei Meßstellen in der Presse, ist in Abbildung 82 dargestellt.

Bei $t = 6 \text{ s}$ wurde die Zapfwelle eingeschaltet und die Drehzahl allmählich auf die erforderliche Umdrehungszahl von 540 min^{-1} erhöht. Zum Zeitpunkt $t = 23 \text{ s}$ fuhr das

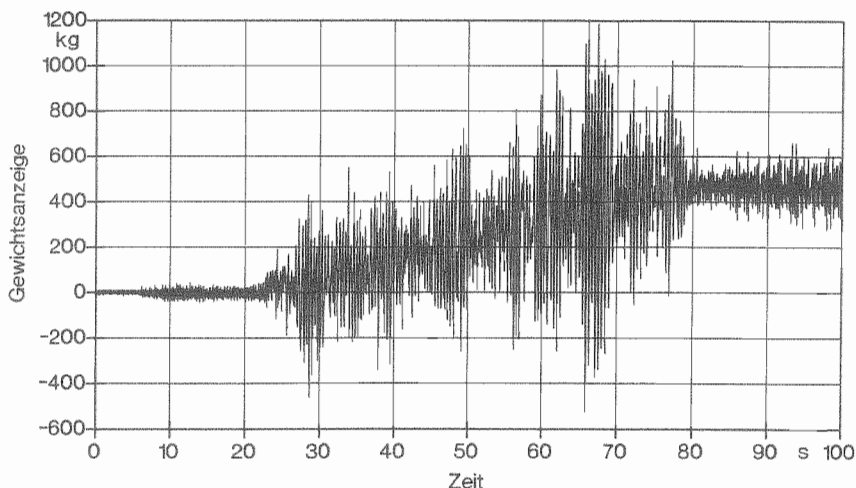


Abbildung 82: Verlauf des Gesamtgewichtssignals beim Pressen eines Ballens (Anwelkgut, Schwad mit 3 m langen Lücken nach jeweils 7 m).

Gespann los und nach weiteren 4 Sekunden begann die Gutaufnahme. Beim Pressen zeigt das Signal Abweichungen von bis ± 800 kg. Die Lücken im Schwad sind im Gewichtssignal nicht erkennbar.

Sowohl die Tiefpaßfilterung, als auch die Spline-Glättung führen zu einer drastischen Reduzierung der Störschwingungen (Abb. 83).

Dargestellt ist die tatsächliche Gewichtsentwicklung des Ballens in der Presse. Die Lücken im Schwad sind in diesem Verlauf als Plateaus erkennbar. Das tiefpaßgefilterte Signal und die Spline-Kurve weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf, wobei die Spline-Kurve noch sehr viel glatter ist als die Ergebniskurve der Filterung. Bei der Spline-Berechnung wurde als Wichtungsfaktor 0,01 gewählt. Dieser ist doppelt so groß wie der Wert, der ursprünglich unter Zuhilfenahme der Tiefpaßfilterung abgeleitet wurde. Damit sollte verhindert werden, daß durch eine zu starke Glättung zuviel an Nutzinformation verloren geht.

Die Abweichungen des tiefpaßgefilterten Signals zum tatsächlichen Gewicht sind sehr unterschiedlich (Abb. 84).

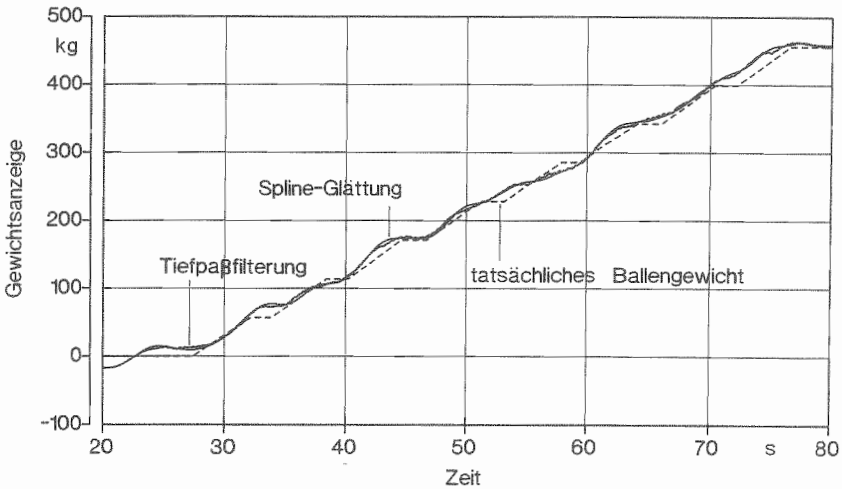


Abbildung 83: Tiefpaßfilterung und Spline-Glättung des Gewichtssignals sowie tatsächliches Ballengewicht (Grenzfrequenz $f_g=0,1$ Hz, Wichtungsfaktor $WF=0,01$).

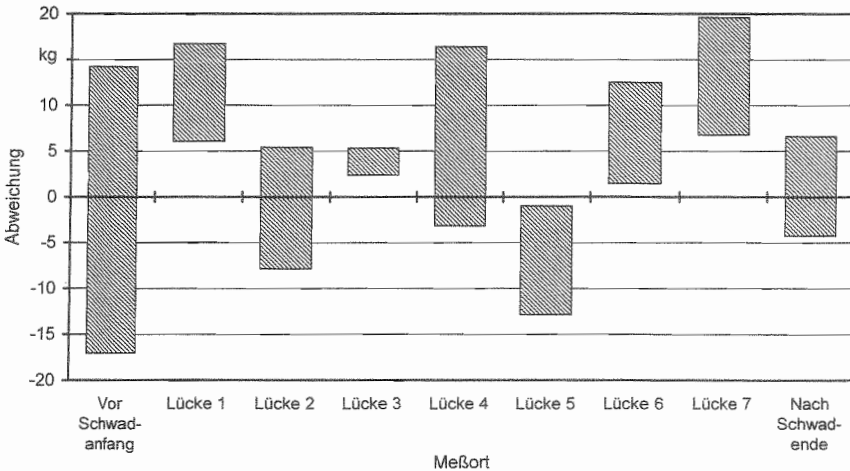


Abbildung 84: Abweichungen des tiefpaßgefilterten Signals vom tatsächlichen Gewicht in den Schwadlücken.

Als Fehlerbetrachtungsbereich wurden die Schwadlücken und der unmittelbare Bereich vor dem Schwad anfang und nach dem Schwadende gewählt, weil in diesen Abschnitten das Gewicht des bis dahin gepreßten Schwades bzw. des Ballens aufgrund der vorher

durchgeführten Wägung der Schwadstücke mit der Plattformwaage exakt angegeben werden konnte. Die Darstellung zeigt die Fehlerspannweiten in den einzelnen Abschnitten für das tiefpaßgefilterte Gewichtssignal. Sämtliche errechneten Fehler liegen in einem Bereich von ± 20 kg. Die größte Spannweite reicht von -16 bis +15 kg und fällt in den Bereich unmittelbar vor dem Schwadanfang; an den anderen Stellen ist die Spannweite wesentlich niedriger. In den einzelnen Lücken reichen die Abweichungen vom Sollwert von wenigen Kilogramm bis hinauf zu 20 kg.

Ähnliche Fehlerwerte liegen auch bei der Gewichtskurve vor, die mit der Spline-Berechnung erzeugt wurde (Abb. 85).

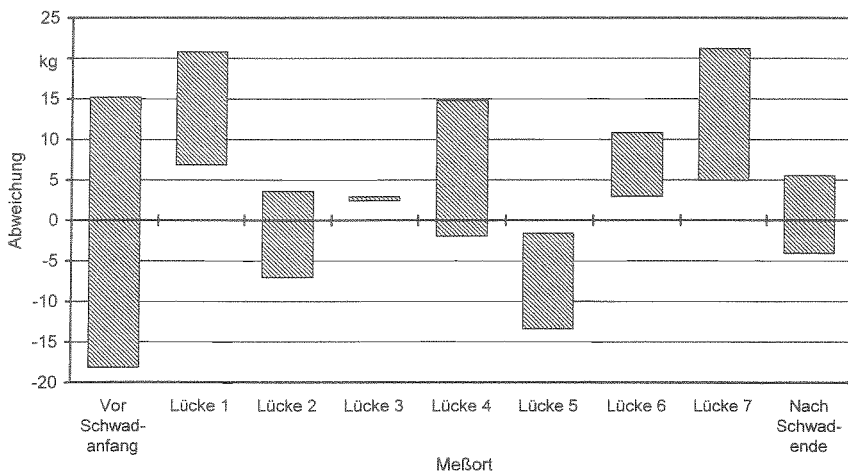


Abbildung 85: Abweichungen der Spline-Kurve vom tatsächlichen Gewicht in den Schwadlücken.

Bei einigen Lücken sind im Vergleich zum tiefpaßgefilterten Gewichtssignal die Fehler etwas geringer, in anderen etwas höher.

6.3.3.2 Genauigkeit des Durchsatzes

Die über Differenzierung der tiefpaßgefilterten Gewichtssignale und der Spline-Kurve festgestellten Durchsätze beim Lückenschwad zeigt Abbildung 86.

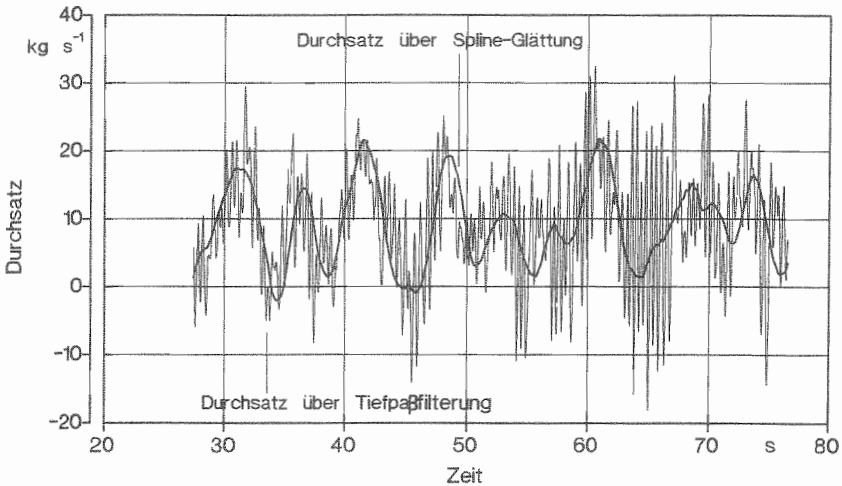


Abbildung 86: Ermittelte Durchsätze beim Pressen des Lückenschwades (Differenzierung der tiefpaßgefilterten Gewichtssignale und der Spline-Kurve).

Dargestellt ist der Bereich vom Schwadanfang bis zum Schwadende. Deutlich wird der Einfluß der Ausgangsgewichtskurve sichtbar: Während die Spline-Kurve zu einem relativ glatten Verlauf führt, entsteht aus dem tiefpaßgefilterten Gewichtsverlauf eine Kurve mit sehr starker Welligkeit; selbst bei sehr kurzen zeitlichen Betrachtungsabschnitten schwanken die Werte um mehr als 100 %.

Ein Vergleich zwischen dem tatsächlichen Durchsatz und dem aus der Spline-Kurve errechneten zeigt sowohl Übereinstimmungen als auch einige größere Differenzen (Abb. 87).

Abgesehen vom Rückgang des Durchsatzes im Zeitraum von $t = 53$ s bis $t = 57$ s, gibt die errechnete Durchsatzkurve überwiegend die Tendenz des wahren Durchsatzes wieder. Teilweise liegt ein leichter Phasenversatz zwischen den beiden Kurvenverläufen vor. Bei allen Schwadstücken (außer dem fünften) mit Gutaufnahme, überschreiten die berechneten Durchsatzwerte die tatsächlichen. Einige Kurvenabschnitte liegen fälschlicherweise im Negativbereich, der in den Lücken vorliegende Nulldurchsatz wird nicht immer korrekt wiedergegeben.

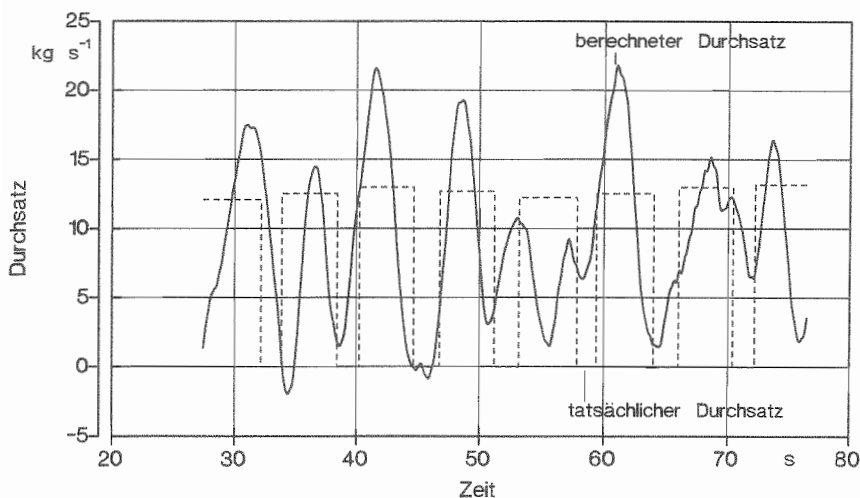


Abbildung 87: Auf Spline-Kurve basierende und tatsächliche Durchsätze beim Lückenschwad.

Da die ursprünglichen Gewichtswerte mit 200 Hz erfasst wurden, liegen auch 200 Durchsatzangaben pro Sekunde vor. Werden die einzelnen Durchsatzwerte vom Lückenschwad zu größeren Einheiten zusammengefaßt, so weisen die neuen Angaben unterschiedlich große Abweichungen vom Sollwert auf (Abb. 88).

Die Aufteilung in Bereiche erfolgte so, daß der Gesamtbereich in jeweils gleich große Abschnitte aufgegliedert wurde. Dadurch fielen die Abschnittsgrenzen in die Schwadlücken. Die Abweichungen des mittleren Durchsatzes vom tatsächlichen Durchsatz, berechnet aus dem tiefpaßgefilterten Signal und der Spline-Kurve, belaufen sich für den gesamten Ballen auf -1,7 % und -1,3 %. Je größer die Zahl der Abschnitte wird bzw. je kleiner sie werden, desto größer werden die Fehler; die Fehler gleichen sich nicht mehr so gut aus. Bei acht Abschnitten, d.h. in jeden Abschnitt fällt ein ganzes Schwadstück, erreichen einige Differenzwerte 30 bis 40 %, wobei aber auch Abweichungen von nur wenigen Prozenten vorkommen.

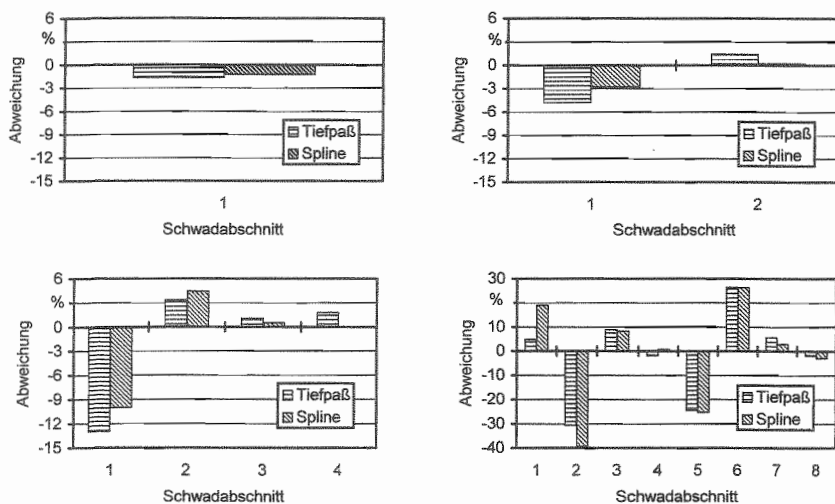


Abbildung 88: Abweichungen der über Tiefpaßfilterung und Spline-Glättung berechneten Durchsätze von den tatsächlichen bei Aufteilung des Lückenschwades in 1, 2, 4 und 8 Abschnitte.

6.3.3.3 Diskussion

Eine dynamische Wägung in der Rundballenpresse und die Ableitung von Durchsatzwerten konnte in dieser Form bislang noch nicht verwirklicht werden. Mit der Tiefpaßfilterung oder der Spline-Glättung konnte der Einfluß der Störschwingungen, die Abweichungen von 800 kg vom Sollgewichtswert hervorrufen, auf absolut 20 kg und weniger bzw. relativ 2,5 % und darunter zurückgedrängt werden.

Vor allem die Spline-Glättung führt zu extrem glatten Kurvenverläufen. Die z.T. gut erkennbaren Plateaus und die teilweisen Gewichtsrückgänge weisen darauf hin, daß ein günstiger Glättungsparameter bzw. Wichtungsfaktor gewählt wurde, der zum einen nicht zu scharf ist, d.h. nicht zuviel an Nutzinformation eliminiert und zum anderen die Störanteile ausreichend entfernt.

Ähnliches trifft auch für den Tiefpaßfilter zu, wobei aber das geglättete Gewichtssignal noch eine Welligkeit aufweist, die Abweichungen von mehreren Kilogramm nach sich ziehen kann.

Die Wägefehler, die in den Schwadlücken festgestellt wurden, liegen überwiegend in einem Bereich von ± 20 kg. Auffallend ist die große Fehlerspannweite für den Bereich vor dem Schwadanfang. Eine Ursache dafür ist ein unterschiedlicher Meßwert für das Gewicht der leeren Presse (Tara) am Schwadanfang und am Schwadende. Für die Gewichtsberechnungen wurde der Tarawert vom Schwadende herangezogen, wodurch der Tarawert am Schwadanfang rechnerisch anstieg und deshalb schon vor dem Losfahren eine Gewichtsabweichung von etwa -16 kg zustande kam. Durch das Fahren (ab $t = 23$ s) sank der Tarameßwert, was zu einer Gewichtsanzeige von etwa 15 kg führte.

In Relation zum jeweiligen Ballengewicht fallen Wägefehler in den Lücken unterschiedlich hoch aus. Die relativen Angaben haben aber eine begrenzte Aussagekraft, da die Bezugswerte von einer Lücke zur nächsten um knapp 60 kg zunehmen. So ist am Schwadanfang bei einem Ballengewicht von 0 kg der relative Fehler unendlich hoch; er geht bei den nächsten Lücken aufgrund des größer werdenden Ballengewichtes zurück.

Die Abweichungen von ca. ± 20 kg liegen in einer ähnlichen Größenordnung, wie die Wägefehler bei der Fahrt mit der Presse ohne Zuladung auf der Wiesenteststrecke (siehe Abb. 65). Diese ähnlich hohen Fehler unterstützen die Folgerung, daß die eingesetzten Signalbereinigungsmethoden die Störschwingungen größtenteils aussondern und die Differenzen zum Sollwert bei der dynamischen Wägung überwiegend auf schwingungsfreie Einflußgrößen wie Reifenauflagefläche oder Rollwiderstand beruhen. Möglichkeiten der Ausschaltung dieser Einflüsse wurden bereits in Kapitel 6.3.1.8 diskutiert.

Bedingt durch den extrem glatten Verlauf der Spline-Gewichtskurve, führt auch die Differenzierung zu einer sehr glatten Durchsatzkurve. Anders bei der tiefpaßgefilterten Gewichtskurve: Ihre leichte Welligkeit wird durch die Differenzierung verstärkt, so daß die entstehenden Durchsatzwerte stark variieren. Für eine punktuelle Betrachtung ist deshalb das Verfahren mit dem Spline besser geeignet.

Die Spline-Kurve gibt die Tendenz des wahren Durchsatzes relativ gut wieder. Die Abweichung vom tatsächlichen Durchsatz, vor allem das Überschwingen, beruht sicherlich auch auf dem ungewöhnlichen Verlauf des tatsächlichen Durchsatzes, der einer Rechteckkurve entspricht. Die Anstiege und Abfälle sind vertikal, die Bereiche mit horizontalem Verlauf zwischen den Sprüngen relativ kurz. Dadurch stellt dieser Kurvenverlauf extrem große Anforderungen an Verfahren zur Gewichtssignalglättung mit Durchsatzberechnung. In der

Praxis ist ein derartig abrupter Wechsel im Durchsatz selten, weshalb derartig hohe Überschwingungen der errechneten Durchsatzkurve wie beim Lückenschwad nicht zu erwarten sind und von einer genaueren Ermittlung des tatsächlichen Durchsatzes ausgegangen werden kann.

Da der Durchsatz durch Differenzierung des Gewichtssignals errechnet wurde, schlagen sich die Wägefehler auch in den Durchsatzwerten nieder. Am deutlichsten ist dies am fünften Schwadstück der Abbildung 87 zu erkennen: in der Mitte dieses Abschnittes (bei $t = 55$ s) geht der gemessene Durchsatz nahe an die Nullmarke heran. Zum Fehlerausgleich ist es deshalb notwendig, entsprechend große Zeitbereiche zu wählen, für die ein gemittelter Durchsatzwert errechnet wird. Wird als Zeitbereich die gesamte Presszeit des Ballens herangezogen, so sind die Durchsatzfehler relativ niedrig. Für eine lokale Ertragsermittlung ist aber die daraus resultierende Auflösung zu gering, der Ballen muß deshalb weiter aufgeteilt werden. Aufgrund des zunehmenden Fehlers wäre für die Trennung im vorliegenden Fall eine Obergrenze von vier Abschnitten zu setzen. Dadurch hätte ein Abschnitt eine Länge von ca. 20 m, die dazugehörige Pressdauer wäre etwa 12 s. Diese Aufteilung stellt einen Kompromiß zwischen einem akzeptalen Fehler und einer ausreichenden geographischen Auflösung für eine lokale Ertragskartierung dar.

6.4 Lokale Ertragsermittlung

Ziel der lokalen Ertragsermittlung ist die geographische Zuordnung (Georeferenzierung) der Erträge zu den einzelnen Teilflächen eines Schlag und deren Visualisierung in Form einer Ertragskarte. Zur Berechnung der lokalen Ertragswerte und deren Georeferenzierung sind bestimmte Größen erforderlich. Dabei handelt es sich im Falle der Rundballenpresse um die gemessenen Gewichtswerte, die dazugehörigen, mit GPS ermittelten Meßortkoordinaten sowie Informationen, die mit Hilfe von *SATAZA* aus den erfaßten Arbeitszeitdaten gewonnen werden können. Die Herleitung der einzelnen Eingangsgrößen und die Berechnung der lokalen Erträge mit der graphischen Ergebnisdarstellung wird im folgenden dargestellt.

6.4.1 Methodik und Datenanalyse

6.4.1.1 Versuchsdurchführung

Beispielhaft wurde für einen Schlag die lokale Ertragsermittlung mit Ertragskartierung durchgeführt. Mit der Rundballenpresse und dem Schlepper wurden 21 Schwade Wiesenheu (1. Schnitt) gepreßt. Dabei handelte es sich um die bereits erwähnte Grafwiese (siehe Abb. 28) mit einer Fläche von 1,5 ha. Zur dynamischen Gewichtserfassung diente die selbe Technik wie beim Lückenschwad. Darüber hinaus erfolgte eine Wägung bei Fahrzeugstillstand (statische Wägung) vor dem Auswerfen eines fertigen Ballens (Bruttowägung) und eine unmittelbar danach (Tarawägung), wobei das Gespann zwischen beiden Gewichtsermittlungen nicht verrückt wurde. Außerdem wurde jeder Ballen mit der Kranwaage gegengewogen. Mit *rb7_0* und der entsprechenden Erfassungstechnik erfolgte die Erhebung der Arbeitszeitdaten. Zusätzlich wurde der Fahrweg mit den GPS-Empfängern von ASHTECH ermittelt.

6.4.1.2 Berechnung der lokalen Erträge

Die Grundlage für eine Berechnung des Ertrages E_{lokal} einer Teilfläche eines Schlages bildet Formel (12):

$$E_{\text{lokal}} \text{ [dt/ha]} = \frac{\dot{m} \text{ [kg/s]}}{v \text{ [m/s]} * b \text{ [m]}} * \frac{100 \text{ [dt m}^2\text{]}}{\text{[kg ha]}} \quad (12)$$

mit \dot{m} : Durchsatz
 v: Fahrgeschwindigkeit
 b: Bezugsflächenbreite

Die Division des Durchsatzes pro Zeiteinheit durch die Geschwindigkeit führt zum Durchsatz pro Längeneinheit; die anschließende Teilung durch die Flächenbreite ergibt den Ertrag in Kilogramm pro Quadratmeter. Die Umrechnung von kg/m^2 in dt/ha als gebräuchliche Einheit für den Ertrag erfolgt mit Hilfe des zweiten Bruches.

Zur Berechnung der einzelnen Größen in der Formel für die lokalen Ertragswerte wurde folgendermaßen vorgegangen, wobei sich die Erläuterungen nach Abfolge der Datenverarbeitung richten:

Bezugsflächenbildung: Wie bereits erläutert, müssen zur Kompensation der Gewichtsermittlungsfehler Wägewerte über eine Mittelwertberechnung zusammengefaßt werden. Aufbauend auf den Ergebnissen vom Lückenschwad wurden die Gewichtsdaten so zusammengeführt, daß in Abhängigkeit von der Schwadlänge für die einzelnen Schwade der Grafwiese vier, fünf oder sechs Abschnitte bzw. Bezugsflächen entstanden. Daraus resultierten Abschnittslängen von etwa 27 bis 36 m, wobei für den einzelnen Schwad die Längen konstant waren.

Bezugsflächenbreite: Da ein Schwad durch Zusammenrechnen des Erntegutes einer Fläche entsteht, entspricht die Schwadbreite nicht der Bezugsflächenbreite. Es wurde deshalb angenommen, daß ein Schwad von jeweils der halben Fläche herrührt, die zwischen ihm und seinem linken und rechten Nachbarschwad liegt. Außerdem wurde davon ausgegangen, daß der bei Gutaufnahme mit GPS ermittelte Fahrweg dem Schwadverlauf entspricht. Zur Ermittlung der Bezugsflächenbreite wurde deshalb zwischen zwei benachbarten Schwaden eine Trennlinie mit Hilfe von *AutoCad* gezogen. Dabei wurde alle 5 m entlang der Schwade mit einem Punkt die jeweilige Distanzmitte zwischen zwei Schwaden markiert und anschließend die Punkte zu einer Linie verbunden. Bei den Randschwaden diente die Schlaggrenze als zweite Begrenzungslinie. Damit lagen für jeden Schwad die Umrisse seiner Ausgangsfläche vor. Diese Flächen wurden nach den Vorgaben im vorherigen Absatz in vier, fünf oder sechs Abschnitte aufgeteilt und ihre Fläche mit *AutoCad* berechnet. Die mittlere

Bezugsflächenbreite ergab sich durch eine Division des Flächenwertes durch die Länge des Schwadabschnittes. Da der Anbringungsort der GPS-Antenne 63 cm neben der Fahrzeuglängsachse lag, wurde vor dem Einziehen der Trennlinien und den Breitenmessungen dieser Versatz durch eine entsprechende Verschiebung der aufgezeichneten Fahrspuren mit Hilfe von *AutoCad* korrigiert.

Geschwindigkeit: Weil bei diesen Versuchen der GPS-Empfänger konfigurationsbedingt keine Werte für die Fahrgeschwindigkeit ausgab, wurden sie mit Hilfe von *SATAZA* ermittelt. Dies erfolgte durch eine Division der zurückgelegten Strecke durch die benötigte Zeit.

Durchsatz: Da aufgrund bereits erläuterten Wägefeler nicht auszuschließen war, daß z.B. beim Wenden fälschlicherweise eine Ballengewichtszunahme festgestellt wurde, mußten in den Dateien mit den Gewichtsdaten zuerst die Bereiche ohne Gutaufnahme gelöscht werden. Die Erkennung dieser Abschnitte erfolgte dabei mit Hilfe von *SATAZA*. Zur Berechnung der Durchsätze diente die für den Lückenschwad entwickelte Methode mit der Spline-Glättung und der Differenzierung. Da die GPS-Antenne auf dem Schlepper und nicht auf der Presse über der Pick-up angebracht war, wurde zur exakten geographischen Zuordnung der Durchsätze dieser Versatz durch eine zeitliche Verschiebung der Durchsatzwerte um 1 s ausgeglichen. Danach erfolgte die Bestimmung der mittleren Durchsätze für die einzelnen Bezugsflächen eines Schwades und deren geographische Zuordnung. Abschließend wurde aus Vergleichsgründen das Gewicht jedes Ballens aus den Durchsatzwerten errechnet und dem tatsächlichen Ballengewicht gegenüber gestellt.

6.4.1.3 Ertragskartenerstellung

Für die Erstellung von Ertragskarten gibt es eine Reihe von Algorithmen, die in verschiedensten Computerprogrammen implementiert sind [37, 53, 57, 58, 61, 69, 71]. Aussagekräftige Kriterien, welches Verfahren bei bestimmten Bedingungen eingesetzt werden soll, konnten in der Literatur nicht gefunden werden. Von den Autoren werden ohne genaue Begründung die verschiedensten Verfahren eingesetzt [24, 51, 61, 100, 101, 140, 154, 162, 181]. Da die Ermittlung, welches Kartierungsverfahren das geeignetste ist, nicht Gegenstand der eigenen Untersuchungen sein soll, wurden zwei gängige Verfahren ausgewählt.

Beim ersten Verfahren wurde ein Parzellenraster mit 36*36 m großen Parzellen über den Schlag gelegt. Die Rastergröße wurde von den Schwadabschnittslängen, der durchschnittlichen Bezugsflächenbreite (achtfache von 4,6 m) und praktischen Faktoren, z.B. gängige Arbeitsbreiten bei Verteilarbeiten, abgeleitet. Für jede Parzelle wurde der Mittelwert der in ihr liegenden Ertragswerte errechnet und die Ergebnisse in Form einer Rasterkarte dargestellt. Zur Herleitung der Ertragsklassengrößen dienten die Höhen und die Verteilung der ermittelten lokalen Ertragswerte. Die Kartenerstellung erfolgte mit dem geographischen Informationssystem "PC ARC/INFO", Version 3.4 D, von ESRI.

Für das zweite Verfahren wurde der Kriging-Algorithmus zur Kartenberechnung ausgewählt, da dieser eine Reihe von Vorteilen mit sich bringt [50, 53, 58, 175]. Die Berechnung erfolgte mit dem Programm "Surfer", Version 4.14 von GOLDEN SOFTWARE. Die Ergebnisse wurden als Isolinienetragskarte (Konturkarte) ausgegeben.

6.4.2 Ergebnisse

6.4.2.1 Statische Gewichtsermittlung

Mit der statischen Gewichtsermittlung konnte das Gewicht der Heuballen von der Grafwiese mit hoher Genauigkeit festgestellt werden (Abb. 89).

Bei tatsächlichen Ballengewichten von 278 bis 422 kg (Durchschnitt 375 kg) liegen die Abweichungen zwischen -5 und +1 kg (-1,4 und +0,3 %). Der mittlere Fehler beträgt -2,4 kg ($s = 1,43$ kg) bzw. -0,6 % ($s = 0,37$ %). Mit Ausnahme eines Wertes liegen alle Abweichungen im negativen Bereich. Wegen eines Speicherverwaltungsproblems des Erfassungsprogrammes stehen für drei Ballen keine Werte zur Verfügung.

6.4.2.2 Dynamische Gewichtsermittlung

Auch mit der dynamischen Wägung liesen sich die Gewichte der Ballen feststellen, wobei aber größere Fehler als bei der statischen Gewichtsermittlung zu verzeichnen waren. Abbildung 90 zeigt die Abweichungen zwischen dem tatsächlichen Ballengewicht und den Ballengewichten, die durch die Multiplikation des mittleren Durchsatzes (abgeleitet von den Wägewerten) mit der Gutaufnahmedauer errechnet wurden.

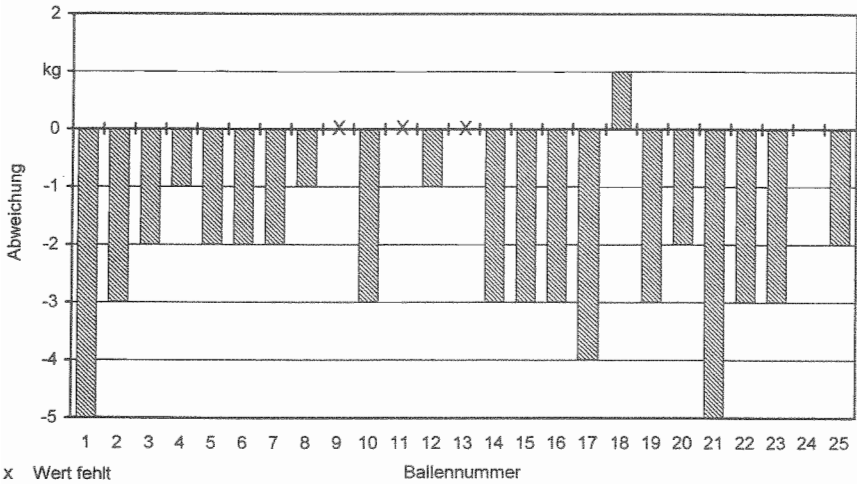


Abbildung 89: Absolute Abweichungen des ermittelten vom tatsächlichen Ballengewicht (Grafwiese, 29.6.1995, Wägung statisch).

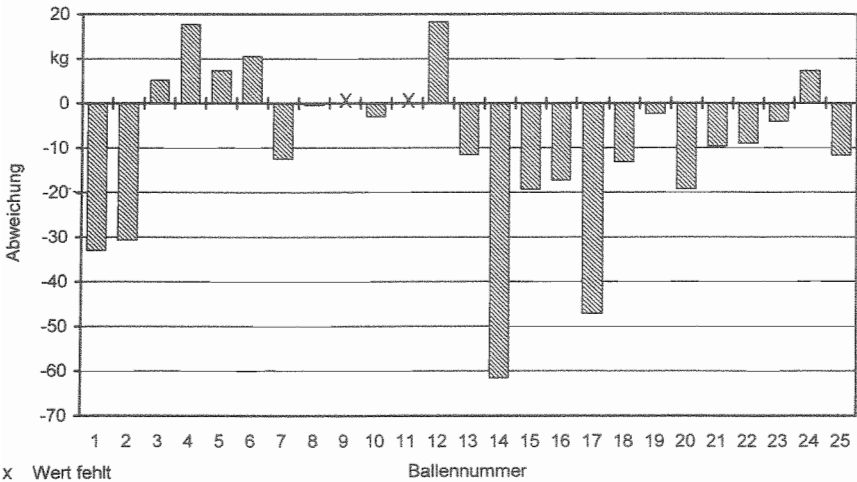


Abbildung 90: Absolute Abweichungen des ermittelten vom tatsächlichen Ballengewicht (Grafwiese, 29.6.1995, Wägung dynamisch).

Die absoluten Abweichungen erstrecken sich von ca. -60 bis +20 kg, der mittlere Fehler beträgt -10,5 kg, die Standardabweichung 19,4 kg. Bei einer detaillierteren Einteilung in Fehlerklassen zeigt sich folgendes Resultat (Tab. 21):

Tabelle 21: Absolute Abweichungen vom tatsächlichen Ballengewicht bei der dynamischen Gewichtsermittlung (eingeteilt in Fehlerklassen, Grafwiese, 29.6.1995).

Abweichung	Anzahl absolut	Anzahl relativ
0 bis $\pm 10,0$ kg	10	43,5 %
$\pm 10,1$ bis $\pm 20,0$ kg	9	39,1 %
$\pm 20,1$ bis $\pm 30,0$ kg	0	0,0 %
$\pm 30,1$ bis $\pm 40,0$ kg	2	8,7 %
$\pm 40,1$ bis $\pm 62,0$ kg	2	8,7 %

Bei etwa 80 % der Ballen liegen folglich die Abweichungen von den Gewichtswerten in einem Bereich von ± 20 kg.

Die relativen Abweichungen reichen von ca. +5 bis etwa -16 % (Abb. 91).

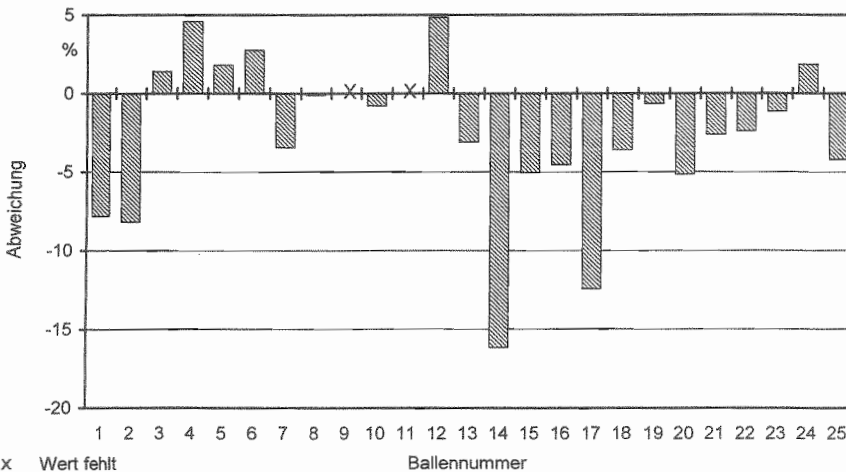


Abbildung 91: Relative Abweichungen des ermittelten vom tatsächlichen Ballengewicht (Grafwiese, 29.6.1995, Wägung dynamisch).

Der durchschnittliche relative Fehler beträgt -2,8 %, die Standardabweichung 5,08 %. Aufgegliedert in Fehlerklassen führt dies zu den Resultaten von Tabelle 22.

Bei fast drei Viertel der Ballengewichte liegen die Fehler in der Spanne von ± 5 %, im Bereich von ± 10 % sind es bereits über 90 % der Fehlerwerte.

Tabelle 22: Relative Abweichungen vom tatsächlichen Ballengewicht bei der dynamischen Gewichtsermittlung (eingeteilt in Fehlerklassen, Grafwiese, 29.6.1995).

Abweichung	Anzahl absolut	Anzahl relativ
0 bis $\pm 5,0$ %	17	73,9 %
$\pm 5,1$ bis $\pm 10,0$ %	4	17,4 %
$\pm 10,1$ bis $\pm 15,0$ %	1	4,3 %
$\pm 15,1$ bis $\pm 16,2$ %	1	4,3 %

6.4.2.3 Bezugsflächen und -breite

Durch die mit Hilfe von *AutoCad* durchgeführte Aufteilung der Schwade entstanden 105 Teilflächen, auf die sich die ermittelten Durchsätze beziehen. Sie sind in Abbildung 92 dargestellt.

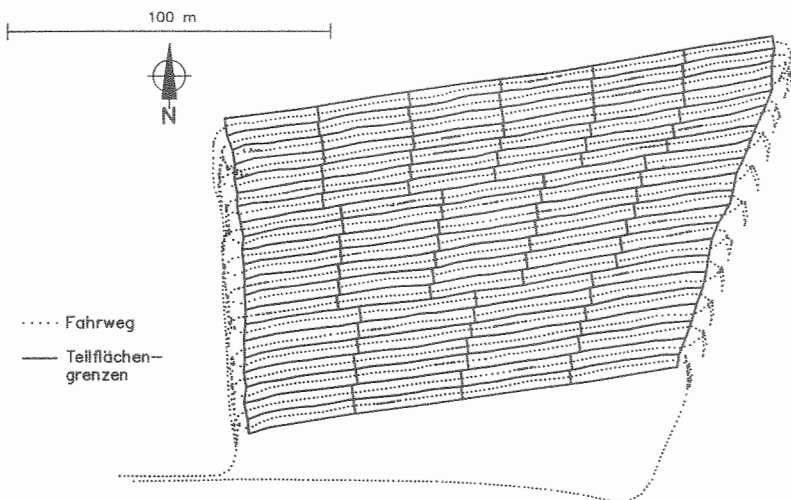


Abbildung 92: Durchsatzbezugsflächen der Grafwiese für die lokale Ertragskartierung (29.6.1995).

Bei den anschließend ermittelten Breiten der Bezugsflächen erstrecken sich die Werte von 3,8 bis 5,1 m. Der Mittelwert liegt bei 4,6 m, die Standardabweichung beträgt 0,23 m.

6.4.2.4 Fahrgeschwindigkeiten

Die berechneten mittleren Fahrgeschwindigkeiten bei der Gutaufnahme für die einzelnen Bezugsflächen reichen von 1,56 bis 2,14 m/s. Der Mittelwert beträgt 1,94 m/s, die Standardabweichung hat einen Wert von 0,122 m/s.

6.4.2.5 Durchsätze und lokale Ertragswerte

Für 101 der 105 Bezugsflächen konnte der mittlere Durchsatz errechnet werden. Bei vier Flächen war eine Ermittlung aufgrund von Problemen bei der Datenerfassung nicht möglich. Die Durchsatzwerte, die Geschwindigkeiten und die Bezugsflächenbreiten führten schließlich zu den lokalen Ertragswerten. Die Verteilung der festgestellten Ertragswerte ist in Abbildung 93 zu sehen.

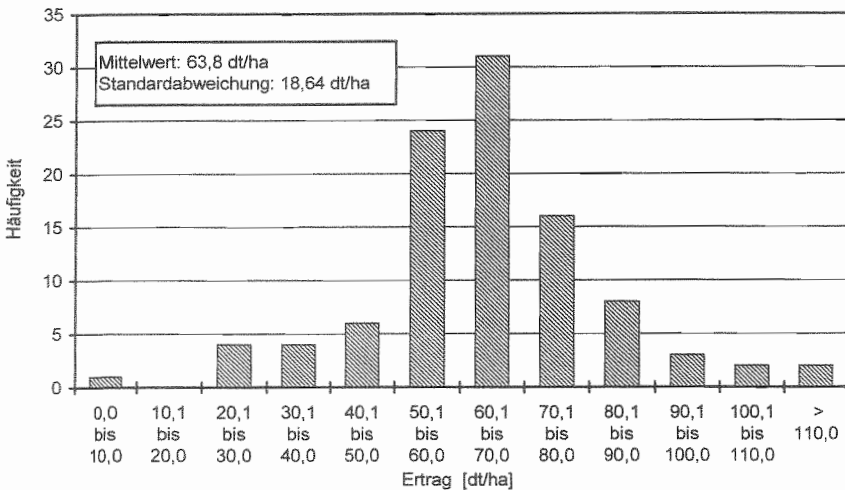


Abbildung 93: Häufigkeitsverteilung der lokalen Heuerträge (Grafwiese, 29.6.1995, 1. Schnitt).

Der Durchschnitt aller Ertragswerte beträgt 63,8 dt/ha, die Standardabweichung liegt bei 18,64 dt/ha. Da die Flächen, auf die sich diese Ertragswerte beziehen, nicht gleich groß sind, ist der angegebene Mittelwert nicht gleich dem durchschnittlichen Ertrag für den gesamten

Schlag. Werden die einzelnen Flächengrößen mit einbezogen, so ergibt sich für die Grafwiese ein durchschnittlicher Ertrag von 63,5 dt/ha.

Zur Beurteilung der Genauigkeit der lokalen Ertragswerte wurde der durchschnittliche Ertrag für die Grafwiese auch über die aufsummierten Ballengewichte, die mit der Kranwaage ermittelt wurden, berechnet. Der festgestellte Wert beläuft sich auf 63,5 dt/ha und ist mit dem Wert des vorhergehenden Berechnungsverfahrens identisch.

6.4.2.6 Ertragskarte

Für die Grafwiese wurde je eine Raster- und Isoertragslinienkarte erstellt (Abb. 94 und 95).

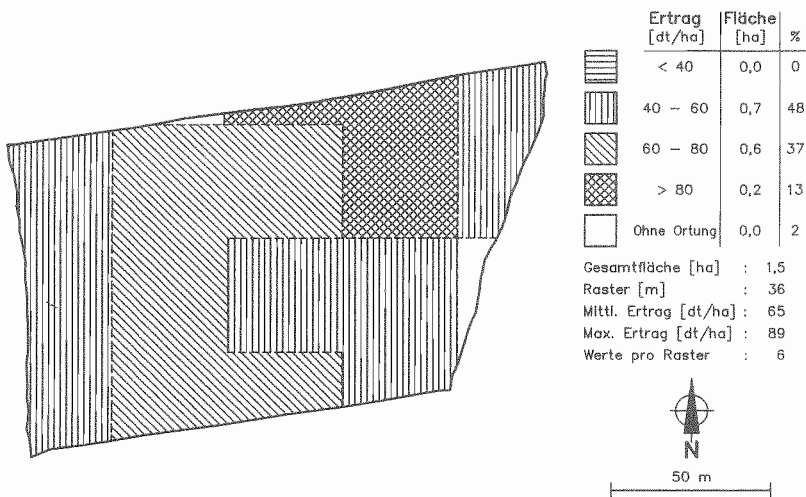


Abbildung 94: Rasterertragskarte für die Grafwiese (1,5 ha, Heu, 1. Schnitt, 29.6.1995).

In beiden Karten werden im östlichen und westlichen Teil der Grafwiese Bereiche mit niedrigen Erträgen sichtbar. Die höchsten Erträge sind im nördlichen Teil der Wiese auszumachen.

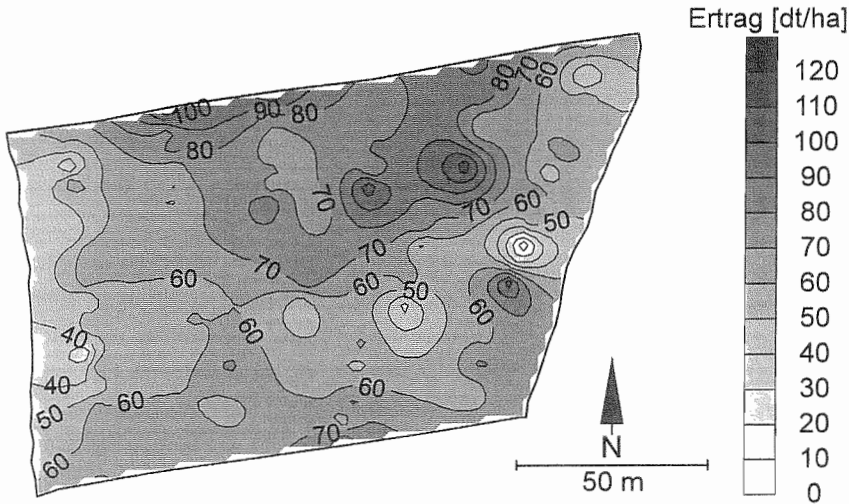


Abbildung 95: Isoertragslinienkarte für die Grafwiese (1,5 ha, Heu, 1. Schnitt, 29.6.1995).

6.4.3 Diskussion

Mit der Ertragskarte für die Grafwiese ist erstmals eine lokale Ertragsermittlung mit der Rundballenpresse in dieser Form gelungen. Es liegen zwar Ertragskarten für Halmgut von anderen Autoren vor, aber diese basieren auf der Ertragsermittlung im Feldhäcksler [26, 67].

Grundlage dieser Ertragsermittlung bildet die Wägung in der Presse mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung und der Scherspannungsmessung auf DMS-Basis in den Achsstummeln. Im statischen Betrieb betragen die Wägefehler nur wenige Kilogramm. Bei der Grafwiese weisen sie aber fast alle ein negatives Vorzeichen auf. Die Ursache dafür ist ein systematischer Fehler. Eine nachträgliche Überprüfung ergab, daß der Kalibrierungsfaktor für die DMS in den Achsstummeln zu niedrig war. Wird dieser Faktor durch einen Anhebung der Abweichungswerte um den Betrag des mittleren Fehlers kompensiert, so weisen drei Viertel der Gewichtswerte einen Fehler von 0 bis ± 1 kg auf (Tab. 23).

Beim verbleibenden Viertel sind die Abweichungen nicht größer als ± 3 kg. Dementsprechend gering sind auch die resultierenden relativen Gewichtsabweichungen: Sie betragen alle weniger als ± 1 %, drei Viertel der Wägefehler liegen sogar innerhalb von $\pm 0,5$ %.

Tabelle 23: Absolute Abweichungen vom tatsächlichen Ballengewicht bei der statischen Gewichtsermittlung (eingeteilt in Fehlerklassen, Grafwiese, 29.6.1995).

Abweichung	Anzahl absolut	Anzahl relativ
0 bis ± 1 kg	17	77,3 %
± 2 kg	2	9,1 %
± 3 kg	3	13,6 %

Diese Resultate stellen gegenüber den Ergebnissen von ROTTMIEIER 1996 [145] eine erhebliche Genauigkeitssteigerung dar. Ein von ihm durchgeführter Praxisversuch im Jahre 1992 mit 71 Rundballen führte bei mehr als einem Drittel der Ballen zu Wägefehler von mehr als ± 10 kg. Als Hauptursache für die geringen Abweichungen bei den eigenen Ergebnissen kommt der Einsatz der Wägezelle in der Anhängerkupplung in Frage. Unterschiedliche Hebelarmlängen, die bei ROTTMIEIER die Gewichtsermittlung über die Biegespannungsmessung beeinträchtigten, werden durch die Wägezelle ausgeschlossen.

Mit der eingesetzten Technik und der Wägung des fertigen Ballen bei Fahrzeugstillstand wäre deshalb eine lokale Ertragsermittlung mit sehr exakten Ertragswerten möglich. Nachteilig wäre aber die geringe geographische Auflösung in eine Richtung: Bei der Form der Fläche, von der ein Ballen gepreßt wird, handelt es sich um ein gestrecktes Rechteck, dessen Verhältnis der Länge zur Breite häufig über 20 : 1 liegt. Durch die große Ausdehnung in Längsrichtung von 100 m und mehr, würden die in dieser Richtung auftretenden Ertragsunterschiede nicht zum Vorschein kommen, weil für diese Fläche nur ein Wert vorliegen würde.

Desweiteren hätten Wägefehler größere Auswirkungen, da für eine relativ große Fläche (500 bis 1000 m²) nur ein einziger Gewichtswert ermittelt werden würde. Zu bedenken wäre auch der Zeitfaktor. Da die genauen Gewichtswerte nur im statischen Betrieb erreicht werden, muß zum Zeitpunkt der Messung vor und nach dem Ballenauswerfen das Fahrzeug stillstehen. Die Folge wäre eine zeitliche Verzögerung in einer Größenordnung von ca. 20 s. Aus diesen Gründen ist die dynamische Wägung vorzuziehen.

Bei der dynamischen Wägung sind die Abweichungen erwartungsgemäß größer als bei der statischen. Für die Grafwiese liegen die absoluten und relativen Abweichungen - ähnlich wie bei der stationären Gewichtsermittlung - überwiegend im negativen Bereich. Als eine Ursache hierfür ist der bereits erwähnte zu niedrige Kalibrierungsfaktor für die DMS zu nennen. Die Behebung dieses Fehlers wäre durch eine Neukalibrierung relativ leicht möglich.

Da die Ballengewichte durch die Multiplikation des mittleren Durchsatzes mit der Gutaufnahmedauer errechnet wurden, ist ein weiterer Grund für die zu niedrigen Ballengewichte bei dem Verfahren zur Gutaufnahmeermittlung zu finden. Wie bereits erläutert, wurden die Abschnitte mit der Gutaufnahme über die Daten der automatisierten Arbeitszeiterfassung und der Analyse mit *SATAZA* festgestellt. Die Aufzeichnungsrate betrug dabei 1 Hz, d.h., daß im Abstand von einer Sekunde überprüft wurde, ob an der Pick-up eine Gutaufnahme vorlag. Beginnt die Gutaufnahme (am Schwadanfang oder nach dem Binden eines Ballens) unmittelbar nach einer Überprüfung, zu deren Zeitpunkt aber noch keine Gutaufnahme vorlag, so wird der Abschnitt bis zur nächsten Erfassung fälschlicherweise nicht als Gutaufnahme eingestuft. Er geht deshalb nicht in die Berechnung des Ballengewichtes mit ein. Durch die Abtastrate von 1 Hz kann dieser Fehler bis zu fast 1 s betragen. Da auf der Grafwiese die Bildung eines Ballens sich meistens über zwei Schwade erstreckte, startete die Gutaufnahme für einen Ballens zweimal. Wird von einem durchschnittlichen Durchsatz von 5 kg/s ausgegangen, so kann der Gesamtfehler aufgrund der fehlerhaften Abschnittseinstufung beim Beginn der Gutaufnahme im ungünstigsten Fall bis zu 10 kg ($2 * 1 \text{ s} * 5 \text{ kg/s}$) pro Ballen betragen. Dies entspricht bei einem Gewicht von 375 kg, dem Durchschnittsgewicht der Ballen der Grafwiese, einem relativen Fehler von 2,7 %. Dieser Fehler hat aber für die eigentliche lokale Ertragsermittlung keine große Relevanz, da nicht mit dem Gesamtballengewicht sondern mit den jeweiligen Durchsätzen gerechnet wird. Es wäre trotzdem wünschenswert, daß eine hochfrequentere und damit genauere Erkennung der Gutaufnahme stattfände und dies bereits bei der Wägewerterfassung auf dem Schlag. Dadurch würde die Speicherung der nicht benötigten Gewichtswerte bei den Wendevorgängen oder Leerfahrten und ein Verarbeitungsschritt bei der Datenanalyse entfallen.

Aus den Fehlerwerten stechen die Angaben für vier Ballen hervor, deren Abweichungen von etwa -30 bis -60 kg reichen. Bei ihnen müssen noch andere als die beiden bereits erläuterten Einflüsse zum Tragen gekommen sein. Einen wesentlichen Anteil daran haben vermutlich die in Kapitel 6.3.1 vorgestellten schwingungsfreien Einflüsse auf die Scherspannungsmessung in den Achsstummeln.

Da die Feststellung der Bezugsflächenbreite vom Fahrweg ausgeht, beeinträchtigen die Fehler der Fahrwegsortung mit GPS auch die Genauigkeit der Ermittlung der Flächenbreite. Wie bereits festgestellt wurde, lagen bei diesem Versuch die Ortungsfehler unter $\pm 50 \text{ cm}$. Der Fehler bei einer Breitenmessung beträgt im ungünstigsten Fall den zweifachen Ortungsfehler.

Zu Fehlern in der Breitenfeststellung führt auch der Unterschied zwischen Fahrweg und tatsächlichem Schwadverlauf. Um eine optimale Ballenform zu erreichen, ist häufig ein schlangenlinienartiges Fahren über den Schwad erforderlich. Dadurch entsteht eine gewisse Abweichung zwischen Schwadverlauf und Fahrweg. Diese wird in erster Linie von der Schwadbreite, der Arbeitsbreite der Pick-up und der Spurweite des Schleppers bestimmt. Je nach Größe dieser Einflußparameter können die Abweichungen mehrere Dezimeter betragen. Dieser Einfluß könnte durch eine Versetzung der GPS-Antenne vom Schlepper auf die Presse reduziert werden.

Das entwickelte Verfahren zur Ermittlung der Bezugsflächenbreite beruht auf der Annahme, daß die Trennlinie zwischen zwei Schwaden genau in der Mitte verläuft. In der Praxis ist dies aber oft nicht der Fall. Deshalb müßte die tatsächliche Trennlinie erfaßt werden. Eine naheliegende Lösung für diese Aufgabe wäre z.B. der Einsatz des GPS beim Schwaden zum Erfassen der Trennlinien. Beim Strohschwad, der vom Mähdrescher herrührt, könnte auf die tatsächliche Arbeitsbreite des Mähdreschers zurückgegriffen werden, denn die Arbeitsbreite beim Mähdrescher ist, im Gegensatz zur Rundballenpresse, auch die Bezugsflächenbreite. Automatisierte Techniken zur Arbeitsbreitenmessung am Mähdrescher befinden sich gegenwärtig in der Erprobung [86, 141, 157, 180].

Bei den Auswertungen wurde die Aufteilung der Schwade in Abschnitte und die Ermittlung der Bezugsflächenbreite überwiegend manuell durchgeführt. Diese Analysen nahmen mehrere Stunden in Anspruch. Für Auswertungen im größeren Umfange ist dies aber zu aufwendig, das Verfahren muß deshalb automatisiert werden. Geographische Informationssysteme würden hierzu die entsprechenden Voraussetzungen bieten. Gegenwärtig ist aber noch kein GIS verfügbar, in dem derartige Algorithmen implementiert sind. Da aber einige Systeme über sehr mächtige Makrosprachen verfügen, wären Analysen über diesen Weg programmierbar [13, 37, 70, 71, 84, 92].

Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsberechnung mit *SATAZA* hängt von der Distanzmessung und der dazugehörigen zeitlichen Dauer ab. Die Einflüsse und die erzielbaren Genauigkeiten wurden bereits im Kapitel über die Arbeitszeiterfassung diskutiert. Die dort festgestellten Fehler bei der Geschwindigkeitsmessung waren relativ gering. Auf die Möglichkeit der einfacher durchzuführenden Geschwindigkeitsbestimmung mit Hilfe des GPS wurde schon hingewiesen.

Der über das eigene Verfahren mit dynamischer Wägung ermittelte durchschnittliche Ertrag für die Grafwiese entspricht mit 63,5 dt/ha exakt dem Wert, der über die Ballenwägung mit der Kranwaage zustande kam. Diese Übereinstimmung ist etwas auffallend, weil davon auszugehen ist, daß die Durchsatzwerte etwas zu niedrig ermittelt wurden. Eine Erklärung dafür ist das Fehlen von Ertragswerten. Bekanntlich stand nur für 101 der 105 Teilflächen ein Ertragswert von der dynamischen Wägung zur Verfügung. Da diese Teilflächen in Bereichen mit niedrigeren Erträgen liegen, wurde durch ihr Fehlen in der Mittelwertberechnung der durchschnittliche Ertrag etwas angehoben. Eine weitere Ursache könnte sein, daß die Produkte aus Geschwindigkeit und Bezugsflächenbreite in der Ertragsformel (12) etwas zu niedrig ausgefallen sind.

Der Vergleich der beiden erstellten Ertragskarten zeigt, daß die Rasterertragskarte leichter lesbar und schneller zu interpretieren ist. Dem gegenüber weist die Konturkarte einen größeren Informationsgehalt auf. Lokale Extreme, die durch eine Rasterung überdeckt werden, sind in der Isoertragslinienkarte leicht zu erkennen. Es stellt sich aber die Frage der Ertragsklassenweite, denn diese bestimmt den Informationszuwachs. Die Ertragsklassenweite muß in Abhängigkeit von den Ertragshöhen und den Ertragsmeßfehlern gewählt werden. Ausgehend von Ertragskartierungen bei Getreide von mehr als 300 ha schlägt AUERNHAMMER et al. 1994 [24] bei einem Ertrag von 60 dt/ha und einem Ertragsmeßfehler von $\pm 5\%$ Klassenweiten von 5 dt/ha vor. Aufgrund des durchschnittlichen Ertrages von ca. 60 dt/ha auf der Grafwiese und einem Ertragsmeßfehler von etwa -16 bis +5 % erscheint deshalb die gewählte Ertragsklassenspanne von 10 dt/ha als angebracht.

In der Rasterkarte sind zwei Teilflächen in weiß dargestellt, weil für sie kein Ertragswert vorliegt. Ursache dafür ist die gewählte Aufteilung des Schwades in nur wenige Abschnitte zum Ausgleich von Wägefehlern. Möglich wäre aber eine Aufteilung in Abschnitte mit wenigen Metern bzw. einer Dauer von 1 s. Der Wägefehlerausgleich fände dann durch die Mittelwertbildung im Raster statt. Dadurch stünde für jede Teilfläche ein Ertragswert zur Verfügung. Diese Vorgehensweise wurde aber für die eigenen Analysen nicht in Erwägung gezogen, da gegenwärtig die zu jedem Ertragswert erforderliche Bezugsflächenbreite nur aufwendig manuell ermittelt werden kann. Die Verwendung der durchschnittlichen Breite von 4,6 m für alle Bezugsflächen scheint aufgrund einer Spannweite von 3,8 bis 5,1 m bei einer Standardabweichung von 0,23 m nicht ratsam zu sein. Deshalb wäre ein automatisiertes Verfahren zur Breitenbestimmung wünschenswert.

Der etwas ungerade Verlauf der östlichen und westlichen Kartenbegrenzungslinie beruht darauf, daß nicht die Schlaggrenze, sondern die Schwadanfangspunkte zur Bildung der Begrenzungslinien herangezogen wurden.

7 Verfahrenstechnische Einordnung der Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Wie die Ergebnisse zeigen, ist beim Einsatz der Rundballenpresse eine automatisierte, satellitengestützte Erfassung der Arbeitszeiten mit einer entsprechenden Sensorik möglich und eine Ermittlung lokaler Erträge mit der dynamischen Wägung und GPS zu verwirklichen. Diese Realisierung führt zu einer erheblichen Verbesserung der Datengrundlagen zur wirtschaftlichen Betriebsführung und schafft gleichzeitig eine Basis für eine gezielte, ertragsorientierte lokale Düngung, wodurch die Umwelt entlastet wird.

7.1 Elektrisches/Elektronisches Erfassungssystem

Damit ein Erfassungssystem den Anforderungen der landwirtschaftlichen Praxis gerecht wird, muß es gewisse Kennzeichen aufweisen. Eine wesentliche Grundvoraussetzung ist eine funktionierende Kommunikation zwischen den Systemkomponenten Sensoren, Erfassungssrechner, Betriebs-PC und Mensch. Die Daten müssen von den Sensoren zum Erfassungssrechner gelangen, dort zwischengespeichert und später zur Analyse an den Betriebs-PC weitergegeben werden können [12]. Für den Menschen muß die Bedienung des System ohne Schwierigkeiten möglich sein.

Bei den Untersuchungen wurden frei konfigurierbare und vielseitig einsetzbare Industrie-PC eingesetzt, die den harten Einsatzbedingungen der Landwirtschaft gewachsen sind. In der Praxis ist ein Einsatz derartiger Rechner nicht zu empfehlen, da sie viel Platz benötigen, einen sehr hohen Preis und einen relativ hohen Stromverbrauch haben. Dies trifft für mobile Agrarcomputer weniger zu, aber die bislang hergestellten Geräte konnten nur geringe Datenmengen verarbeiten. Neuere Modelle verfügen über wesentlich leistungsfähigere Prozessoren, für die größere Datenmengen und komplexere Programme kein Problem darstellen [9, 45, 97]. Ausgestattet mit Erfassungsmodulen können Agrarcomputer ausgedehnte und ausführliche Datenerfassungen durchführen.

Bei den eigenen Untersuchungen liefen von jedem Sensor die Versorgungs- und Signalleitungen zum Erfassungsmodul bzw. zur Spannungsquelle. Daher mußten beim Anhängen der Presse an den Schlepper mehrere Kabelstecker verbunden werden. Für den Einsatz in der Praxis ist ein derartiges Verfahren zu aufwendig. Außerdem ist vor allem die Verkabelung besonders störanfällig [47]. Als Lösungsmöglichkeit bietet sich hierzu das "Landwirtschaftliche Bus-System (LBS)" an [107]: Eine vieradrige Busleitung durchzieht den ganzen

Schlepper und die angehängte Maschine; vom Bus erfolgt auf dem kürzestem Weg die Verbindung zu den einzelnen Sensoren mittels Sticheleitungen. Dadurch muß nur noch ein Kabel zwischen Schlepper und Maschine verbunden werden, die Kabellängen werden erheblich verkürzt, die Störanfälligkeit geht zurück.

Ein weiterer Vorteil des LBS ist der bidirektionale Austausch von Daten, wodurch mehrere Elektroniksysteme in einer Schlepper-Gerätekombination miteinander kommunizieren und ein Netzwerk aufbauen können. Die Normierung des Datenprotokolls ("Controller Area Network (CAN)" der Firma BOSCH) und der Schnittstellen (inklusive der Verbindung zwischen Schlepper und Geräten) läßt einen Wechsel von Geräten mit verschiedenartigen Geräterechnern (Jobrechner) von unterschiedlichen Herstellern zu [107]. Die Jobrechner in einzelnen Maschinen können deshalb Erfassungs- und Steuerungsaufgaben übernehmen, die vorher alle vom mobilen Agrarcomputer auf dem Schlepper bewältigt werden mußten. Der Rechner auf dem Schlepper übernimmt die Funktion der zentralen Ein-/Ausgabestation, über die der Landwirt den Prozeß beobachten und in den Prozeß eingreifen kann. Mit einem entsprechenden Übertragungsmedium, z.B. Chipkarte, Kabel etc., erfolgt die Kommunikation (ebenfalls genormt [107]) zwischen der zentralen Ein-/Ausgabestation und dem Betriebs-PC, auf dem erfaßte Daten weiterverarbeitet werden können oder Arbeitsaufträge erstellt werden.

LBS bietet somit eine hervorragende Grundlage für ein automatisiertes Erfassungssystem von Daten unterschiedlichster Art und Menge in den verschiedensten Schlepper-Geräte-Kombinationen. Der Weg der Meßwerte vom Sensor bis zum Betriebsrechner ist exakt definiert, Kompatibilitätsprobleme sind weitgehend ausgeschlossen. Dadurch wird der Landwirt in seiner Geräteauswahl an keinen spezifischen Elektronikhersteller gebunden. Der Preis für einen schlepperinternen Bus mit einem LBS-Terminal incl. Datenaustauschmodul liegt in einer Größenordnung von etwa 10.000,- DM.

7.2 Ortung mit GPS

Wesentlicher Bestandteil eines automatisierten Erfassungssystem ist die Ortung und Zeitermittlung mit GPS. GPS-Empfänger werden schon seit einigen Jahren erfolgreich in der Landwirtschaft eingesetzt und mittlerweile als integrierbares Modul für mobile Agrarcomputer bzw. LBS-Terminals angeboten.

Je nach Genauigkeit sind GPS-Empfänger bzw. -module unterschiedlich teuer. Das hochgenaue ASHTECH-Gerät kostete im Anschaffungsjahr 1992 27.500,- US \$. Gegenwärtig müssen für den gleichen Empfänger 14.000,- US \$ bezahlt werden. Modelle, die in der Genauigkeitsklasse des FURUNO-Gerätes liegen, sind gegenwärtig mit 500,- bis 1000,- DM (Einsteckmodul) wesentlich preisgünstiger. Für den Landwirt wären Empfänger angemessen, die ein etwas höheres Leistungsvermögen als der FURUNO GN-72 und eine Ortungsgenauigkeit von ca. ± 2 m aufweisen. Die Preise für derartige Typen (Einsteckmodul) liegen in einer Größenordnung von etwa 3.000,- DM.

Aufgrund der Abhängigkeit der Ortungsgenauigkeit von der Anzahl an Satelliten ist eine möglichst große Zahl an verfügbaren Satelliten wünschenswert. Mit Hybridempfängern könnte sie etwa verdoppelt werden, da diese Geräte in der Lage sind, sowohl die Signale von den GPS- als auch von GLONASS-Satelliten zu erfassen und in die Positionsberechnung mit einzubeziehen. Dadurch würde die Ortungsgenauigkeit z.T. erheblich ansteigen [134] und die Abhängigkeit von einem Betreiber zurückgehen. Der Nachteil von Hybridempfängern ist der gegenwärtig hohe Preis. Mit mehr als 10.000,- DM liegen sie in einem Bereich, der in den meisten Fällen einen rentablen Einsatz in der Landwirtschaft unmöglich macht. Aber auch bei diesen Geräten ist, ähnlich wie bei den reinen GPS-Empfängern, eine starke Preisreduzierung zu erwarten.

Fällt die Ortung mit Satelliten aufgrund von Abschattungen ganz aus, so müssen größere Lücken mit Hilfe eines Back-up-Systems überbrückt werden. In Frage kämen hierfür vor allem kostengünstige Koppelortungssysteme [118]. Der Hauptnachteil der Koppelortung, nämlich die Aufsummierung der Meßfehler, käme wenig zum Tragen, da die Positionsermittlung nur kurzzeitig bis zur Wiederaufnahme der Ortung mit GPS durchgeführt werden müßte. Der bei alleiniger Verwendung von Koppelortungssystemen auftretende Nachteil der Findung eines Totpunktes entfällt bei kombinierten Systemen ebenso, da GPS die Totpunkte ermitteln kann.

Hinderlich ist die Akquisitionsphase bis zur ersten Positionsangabe nach dem Einschalten des Empfängers. Ist von Anfang an eine exakte Positionsangabe erforderlich, so muß diese Phase abgewartet werden. Die Weiterentwicklungen in der GPS-Empfängertechnologie lassen aber diese Startphase immer kürzer werden [10, 11].

Die differentielle Korrektur der GPS-Positionsdaten in Echtzeit ist für die automatisierte Datenerfassung nicht notwendig. Die Koordinaten können auch durch Post Processing korrigiert werden, wodurch zusätzlich eine höhere Genauigkeit erzielt werden kann. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, eine Korrektur mit verbesserten Post Processing-Programmen zu wiederholen, vorausgesetzt, daß die Rohdaten der Feststation und der Mobil-einheit vorhanden sind. Nachteilig beim Post Processing ist der zusätzliche Datenverarbeitungs-schritt und die notwendige Sorgfalt bei der Datenarchivierung, so daß keine Datenverluste, vor allem bei der Feststation, auftreten. Bei der Echtzeitverarbeitung treten diese Probleme nicht auf, die Positionsdaten werden bei der Erfassung in korrigierter Form abge-speichert. Dieses einfachere Verfahren ist deshalb für den Landwirt in den meisten Fällen das geeignete Verfahren. Zusätzlich kann bei dieser Einsatzform auch exakt navigiert werden.

Unabhängig davon, ob die Positionskorrektur in Echtzeit oder im Post Processing erfolgt, ist eine Feststation für eine ausreichend genaue Ortung immer erforderlich. Gegenwärtig und auch in naher Zukunft ist für den landwirtschaftlichen Betrieb eine eigene Feststation, die eine hohe Genauigkeit ermöglicht, mit einem Preis von etwa 20.000,- DM nicht rentabel. Eine Alternative wäre der überbetriebliche Einsatz einer Feststation, z.B. im Rahmen des Maschinenrings. Ein Echtzeitbetrieb mit einer ungestörten Funkverbindung erfordert einen Sender mit einer entsprechenden Sendeleistung. Bei der eigenen Sendeanlage mit 6 Watt wurden bei allen Untersuchungen (im Umkreis von ca. 5 km des Senders) keine gravierenden Abschattungsprobleme registriert. Diese Sendeleistung ist für die Abdeckung größerer Gebiete bei gemeinschaftlicher Nutzung einer Anlage nicht ausreichend, es werden stärkere Sender benötigt. Hier aber greifen die deutschen Telekommunikationsvorschriften einschränkend ein. Die Obergrenzen für die Leistungen von Sendeanlagen sind sehr niedrig angesetzt. Zusätzlich verlangt die Deutsche Telekom vom Betreiber Gebühren für Sendeanlagen, die über eine bestimmte Leistung verfügen.

Eine andere Möglichkeit wäre die Nutzung bereits vorhandener Referenzdienste. Mittlerweile gibt es Betreiber von Feststationen, deren Dienste auch von Landwirten zur Positionskorrektur herangezogen werden können:

- Langwellen-Echtzeit-DGPS der IfAG und der Deutschen Telekom
- "RDS-RASANT"-System im UKW-Bereich der Rundfunkanstalten
- Feststationsnetz mit satellitengebundener Verbreitung der Korrekturinformation

Unter der Bezeichnung "ALF (Accurate Positioning by Low Frequency)" betreibt das Institut für Angewandte Geodäsie (IfAG) Frankfurt/Main zusammen mit der Deutschen Telekom seit Anfang 1995 eine Feststation mit Langwellensender in Mainflingen bei Frankfurt/Main, die ganz Deutschland mit einem Korrektursignal versorgt [64]. Der Vorteil der Langwelle ist das seltene Auftreten von Abschattungen. Untersuchungen haben aber gezeigt, daß mit zunehmender Distanz von der Feststation die Ortungsfehler in der Mobileinheit größer werden [64]. Pro 100 km ist dabei ein Ortungsfehler von ca. 30 cm zu veranschlagen. Der Preis für einen Langwellenempfänger (incl. einer einmaligen Lizenzgebühr) beträgt etwa 2.000,- DM. Im Hinblick auf das Kosten-Nutzenverhältnis schneidet dieses Verfahren gegenwärtig sehr gut ab.

Die öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten betreiben über ihre UKW-Radiosender das Verfahren "RASANT (Radio Aided Satellite Navigation Technique)" [87]. Als Übertragungsmedium dient hierbei "RDS (Radio Data System)", das von nahezu allen UKW-Sendern unterstützt wird und mit handelsüblichen Radios zu empfangen ist. Ein UKW-Empfang ist in Deutschland auf über 95 % der Fläche möglich. Durch die regionale Senderstruktur können regionale Korrekturdaten eingespeist werden, so daß der Nachteil der Entfernungabhängigkeit von GPS-Korrekturdaten minimiert wird. Teilweise noch unbefriedigend ist die Verfügbarkeit und das relativ hohe Alter des Korrektursignals, wodurch die Ortungsgenauigkeit beeinträchtigt wird [72]. Außerdem sind Abschattungen wesentlich häufiger als bei der Langwellenübertragung.

Grundsätzlich anders sind die Systeme "LandStar" der britischen Firma RACAL [112] und "OMNISTAR" der amerikanischen Firma FUGRO. Die Korrekturinformation wird nicht mit einer, sondern mit mehreren Feststationen ermittelt. So ist bei diesen Systemen z.B. Europa mit einem Netz von zwölf Feststationen abgedeckt. Die Daten dieser Stationen werden nach Verarbeitung über das Netzwerkkontrollzentrum zu einem geostationären Kommunikationssatelliten geschickt, der ganz Europa versorgt. Mit Hilfe einer Empfänger- und Verarbeitungsbox auf dem Schlepper wird dann mit den empfangenen Daten für die Mobileinheit eine individuelle, virtuelle Feststation errechnet, die hochgenaue Korrekturinformationen ausgibt. Mit dieser Technik wird die bei den erstgenannten Verfahren bestehende Entfernungabhängigkeit von der Feststation eliminiert. Bei Untersuchungen zur Genauigkeit lagen die Ortungsfehler innerhalb von ± 1 m (95 % Vertrauensbereich) [112]. Der Preis für einen Empfänger, der die Signale der GPS- und des Kommunikationssatelliten erfäßt, liegt gegenwärtig bei ca. 10.000,- DM. Darin enthalten ist die Nutzungsgebühr der Referenzsignale für

ein Jahr. Für jedes weitere Jahr fällt eine Lizenzgebühr von etwa 1500,- DM an. Trotz der großen Vorteile dieser Systeme muß aufgrund der hohen Kosten zuerst geklärt werden, ob der Einsatz in der Landwirtschaft gerechtfertigt ist.

7.3 Arbeitszeiterfassung

Beim Einsatz der Rundballenpresse ist Datenerfassung zur Arbeitszeitermittlung vom technischen Standpunkt her ohne großen Aufwand für die Praxis zu realisieren. Für die eingesezte Rundballenpresse wird außer dem GPS-Empfänger nur ein zusätzlicher Sensor - zur Erkennung der Gutaufnahme - benötigt. Die Kosten sind dementsprechend gering. Der Arbeitsablauf wird in keiner Weise durch die Erfassung gestört.

Die Verwertung der Informationen der Arbeitszeiterfassung setzt eine Analyse voraus. Die manuelle Analyse mit *SATAZA* ist für den Landwirt keine praktikable Lösung, da sie zu aufwendig ist. Für ihn kommt die automatisierte Auswertung in Frage, da sie schnell und ohne große Vorkenntnisse durchzuführen ist. Vom Ergebnis her sind für den Landwirt vor allem die Angaben der Ebene 1 und 2 in *SATAZA* bedeutsam. Die sehr detaillierten Resultate der dritten Ebene können von besonders interessierten Landwirten auch verwertet werden, ihr Hauptanwendungsgebiet ist aber die Arbeitswissenschaft.

Die Gesamtzeit wird mit dem aufgebauten Erfassungs- und Analysesystem sehr genau ermittelt. Bei den Zeiten für die Tätigkeit und die Unterbrechungen sowie für Haupt-, Neben-, Rüst- und Wegezeit ergeben sich im Vergleich zu den Messungen mit der Stoppuhr teilweise größere relative Fehler. Zur Bewertung der Zeitunterschiede im Hinblick auf die praktische Relevanz eignen sich die Differenzwerte als Anteil an der Gesamtzeit besser, weil bei einigen Arbeitsarten die absoluten Zeiten relativ niedrig sind und deshalb geringe absolute Zeitunterschiede zu großen relativen Fehlerwerten führen können. Bei einer Betrachtung in Relation zur Gesamtzeit liegen die Fehler bei maximal etwa 3 %; diese Größenordnung ist für den Landwirt akzeptabel.

Für die Fehlerbeurteilung auf der Elementebene sind anderen Kriterien anzuwenden, da der Arbeitswissenschaftler andere Zielsetzungen hat. Die Differenzen sind bei einigen Arbeits-/Prozeßelementen als zu hoch zu bewerten. Wie aber bereits hervorgehoben, liegt dies in erster Linie an der fehlenden Identifizierung des Rüstens. Durch eine entsprechende

Programmerweiterung könnte auch dieses Zeitelement ermittelt und die automatisierte Analyse mit *SATAZA* fester Bestandteil von arbeitswissenschaftlichen Untersuchungsverfahren werden. Gegenwärtig kann das noch fehlende Programmodul durch die manuelle Analyse in *SATAZA* ersetzt werden.

Einflußgrößen auf die Arbeitszeit sind in erster Linie für den Arbeitswissenschaftler von Bedeutung. Diese können mit dem aufgebauten Erfassungs- und Analysesystem beim Rundballenpressen relativ exakt und größtenteils automatisiert ermittelt werden. Da die Ermittlung der Einflußgrößen im Arbeitszeiterfassungssystem mit integriert ist und der Arbeitsablauf durch die Erfassung in keiner Weise gestört wird, könnte auch der Landwirt auf sie zurückgreifen.

Das entwickelte Erfassungs- und Analyseverfahren ist nur für den Einsatz der Rundballenpresse anwendbar. Damit auch Einsätze mit anderen Maschinen überwacht werden können, ist eine entsprechende erfassungstechnische Ergänzung und eine softwareseitige Systemerweiterung zur Erfassung und Analyse erforderlich. Für die Erfassungstechnik wäre das LBS von großem Vorteil, da Signale von bereits vorhandenen Sensoren problemlos erfaßt werden könnten und zusätzliche Sensoren einfach zu integrieren wären. Durch den modularen Aufbau stellt eine Erweiterung der Analyse für *SATAZA* keine große Schwierigkeit dar, und so konnte z.B. eine Auswertung von Daten des Ladewageneinsatzes in der Zwischenzeit realisiert werden [187].

7.4 Ertragsermittlung

Mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung und den DMS in den Achsstummeln ist in der Rundballenpresse eine mobile Wägung als Basis einer lokalen Ertragsermittlung zu verwirklichen. Während im statischen Betrieb die Wägefehler unter einem Prozent liegen, muß bei der dynamischen Gewichtsermittlung von Gewichtsfehlern von etwa $\pm 10\%$ und z.T. mehr ausgegangen werden. Die geforderte Fehlergrenze von maximal 2% [145] ist somit im dynamischen Betrieb noch nicht zu erreichen. Grundsätzlich ist aber mit der momentan erzielbaren Genauigkeit eine lokale Ertragsermittlung durchaus sinnvoll.

Verbesserungen zur Erhöhung der Genauigkeit müßten an der Scherspannungsapplikation ansetzen, da der Fehleranteil, der durch die Wägezelle zustande kommt, minimal ist.

Möglichkeiten dazu wurden bereits erörtert. Falls diese Wege nicht zum Erfolg führen sollten, wäre eine komplette Neukonstruktion der Presse mit dem Ziel einer Doppelrahmenbauweise in Erwägung zu ziehen. Das Prinzip des Doppelrahmens zur Gewichtsermittlung hat sich bereits bei den Wägerahmen und Düngerstreuern sehr bewährt [7, 39, 146, 186] (auch die guten Ergebnisse der Wägezelle in der Anhängerkupplung basieren auf diesem Prinzip). In weiterführenden Arbeiten müßte deshalb untersucht werden, inwieweit eine Doppelrahmenbauweise für Futtererntemaschinen realisierbar und rentabel wäre.

Die Wägetechnik auf DMS-Basis ist den harten Anforderungen des landwirtschaftlichen Einsatzes durchaus gewachsen. Dies belegen die störungsfreien Einsätze in mehr als acht Jahren: Über fünf Jahre bei den Versuchen von ROTTMEIER 1996 [145] und anschließend weitere drei Jahre bei den eigenen Untersuchungen.

Durch die Verwendung der Wägezelle in der Anhängerkupplung kann die schlepperseitige Stützlast von jedem aufgesattelten Fahrzeug ermittelt werden. Im Fahrzeug selbst ist eine DMS-Applikation zur Messung der Lasten auf den Achsen prinzipiell immer möglich. Zwischen dem Rad und der Achsbefestigung am Rahmen muß aber ein gewisser Mindestabstand vorhanden sein, damit definierte Scherspannungsverhältnisse bestehen [99]. Zusätzlich sollte das Bauteil keinen allzu großen Querschnitt aufweisen, damit bei Belastung eine möglichst große Dehnung auftritt. Da diese beiden Voraussetzungen bei Gebrauchtfahrzeugen nicht immer gegeben sind, kann eine Nachrüstung in manchen Fällen schwierig werden. Bei Neufahrzeugen können bereits bei der Planung die wägetechnischen Anforderungen berücksichtigt werden. Eine andere Form der Nachrüstung wäre ein Bauteilaustausch: So wie bei der untersuchten Presse praktiziert, könnten die relevanten Bauteile durch solche, die mit DMS-Technik versehen und kalibriert sind, ausgetauscht werden. Dies könnte vom Landwirt selbst durchgeführt werden; ein Spezialist, wie zur oben erwähnten Nachrüstung, wäre nicht mehr erforderlich.

Abgeleitet von den Kosten für Systemkomponenten, die ROTTMEIER 1996 [145] ermittelte, würde die Wägetechnik für eine Rundballenpresse mit etwa 6400,- DM zu Buche schlagen (Tab. 24).

Diese Kostenkalkulation basiert auf Einzelstückzahlen und einem Lohn von 100,- DM pro Stunde für die aufgewendete Arbeit. Die Kosten für die baulichen Änderungen in der Anhängerkupplung beziehen sich auf die Doppelrahmenbauweise.

Tabelle 24: Kalkulierter Verkaufspreis für ein integriertes Wägesystem in einer Rundballenpresse.

System	Wägezelle in der Anhängerkupplung	DMS-Direktapplikation in den beiden Achsstummeln
Sensor(en)	1.600,- DM	100,- DM
Applikation	200,- DM	1.000,- DM
Bauliche Änderungen	1.000,- DM	--,- DM
Elektronik	400,- DM	600,- DM
Summe der beiden Systemkomponenten:	4.900,- DM	
Unternehmensgewinn (30 %):	1.470,- DM	
Gesamtpreis:	6.370,- DM	

Mit der statischen Wägung wären sehr exakte Gewichtswerte für eine lokale Ertragermittlung zu gewinnen. Nachteilig wäre aber die schlechte geographische Auflösung und der Zeitverlust. Diese Nachteile ließen sich mit der dynamischen Wägung vermeiden, dafür müssen aber größere Wägefehler in Kauf genommen werden. Wie die Ergebnisse der Grafwiese zeigen, gleichen sich Fehler aus, so daß für den durchschnittlichen Ertrag der gesamten Wiese ein sehr genauer Wert erzielt wurde.

Eine Möglichkeit zur Verminderung der Ertragsmeßfehler wäre eine verbesserte Erkennung der Abschnitte, bei denen Gut aufgenommen wird. Mit dem momentanen Verfahren erfolgt dies nach dem Pressen mit Hilfe von SATAZA. Zur Steigerung der Genauigkeit wäre eine höhere Signalabtastrate für die Lichtschranke an der Pick-up erforderlich. Angebracht wären 10 Hz, so daß der durch die Abtastrate bedingte Fehler für die Erkennung von Anfangs- und Endpunkten der Gutaufnahme auf maximal etwa 20 cm gesenkt werden könnte.

Würden die Abschnitte mit Gutaufnahme bereits bei der Erfassung auf dem Feld herausgefiltert, so hätte dies eine erhebliche Reduzierung der Datenmenge zur Folge. Mit dem LBS und einem Jobrechner in der Presse wäre dies relativ leicht zu realisieren. Ausgehend vom Algorithmus zur Ermittlung der Gutaufnahme, der in SATAZA implementiert ist, könnte ein Jobrechner in der Presse über den Bus die Fahrgeschwindigkeit und die Zapfwelldrehzahl abrufen und zusammen mit den Signalen von der Lichtschranke der Pick-up die Ermittlung der Gutaufnahmephasen leicht und relativ exakt feststellen. Über den Bus werden dann nur bei Gutaufnahme die Wägedaten zur zentralen Ein-/Ausgabestation auf dem Schlepper geschickt. Da der Bus über eine Übertragungsrate von 125 kbit/s verfügt [107], würde eine

Übertragung der Gewichtswerte, die mit 200 Hz durch die drei Sensoren erfaßt werden, zu einer erheblichen Busbelastung führen. Wie die Untersuchungsergebnisse zeigen, reicht aber der Summenwert der drei Gewichtssensoren aus, die Busbelastung würde somit um 2/3 verringert werden. Eine weitere Reduzierung wäre z.B. durch eine Mittelwertbildung über einen Zeitraum von 1 s durch den Jobrechner auf der Presse möglich.

Der Jobrechner könnte noch weitere Aufgaben übernehmen, so daß nach dem Pressen eine relativ leicht zu analysierende Ertragswertedatei zur Verfügung steht. Der Jobrechner müßte eine Datei schreiben, die die Koordinaten des Erfassungsortes (über LBS), den Durchsatz auf Basis der dynamischen Wägung und die Fahrgeschwindigkeit (über LBS) enthält. Die noch fehlende Angabe zur Berechnung des lokalen Ertrags, die Bezugsflächenbreite, kann erst nach dem Pressen ermittelt werden.

Das momentan verwendete Verfahren zur Ermittlung der Bezugsflächenbreite ist für den Einsatz in der Praxis wenig geeignet, da durch die manuelle Komponente des Verfahrens der Aufwand relativ hoch wird. Deshalb müßte die Breitenfeststellung über den vom GPS ermittelten Fahrweg automatisiert ablaufen. Am günstigsten hierzu wäre ein Modul im GIS, mit dem der Landwirt die Ertragskarten erstellt. Moderne Ackerschlagkarteien enthalten bereits ein geographisches Informationssystem oder verfügen über eine Schnittstelle zu ihm, so daß die Ertragskartenerstellung und weitere Analysen, z.B. Düngerbedarfberechnung, ohne große Schwierigkeiten durchgeführt werden können.

Aufgrund der wechselnden Feuchtigkeitsgehalte ist eine Ertragsermittlung bei Grüngut, Anwelkgut, Heu oder Stroh nur in Kombination mit einer kontinuierlichen Feuchtemessung sinnvoll. Für die Bestimmung der Materialfeuchte gibt es eine Reihe verschiedener Verfahren [104, 115, 143], von denen sich auch einige für den Einsatz in landwirtschaftlichen Maschinen eignen. Kostengünstige und exakt messende Systeme insbesondere für Güter mit Feuchtigkeitsgehalten von über 30 % stehen gegenwärtig aber nicht zur Verfügung [115]. Weitere Entwicklungsarbeiten sind deshalb erforderlich.

Ausführlichere Untersuchungen sind zur Klärung der Frage erforderlich, ob die gewählte Rastergröße und die Ertragsklassenweite für alle Halmgüter geeignet sind. Insbesondere müßte festgestellt werden, inwieweit Gutverlagerungen durch Drusch, Zetten, Wenden und Schwaden auftreten und diese bei der Bestimmung der Bezugsflächenbreite und bei der Wahl von Rastergröße und Ertragsklassenweite berücksichtigt werden müssen.

8 Zusammenfassung

Für eine ökonomisch und ökologisch ausgerichtete Betriebsführung fehlt es dem Landwirt vielfach an betriebspezifischen Daten. Ein besonders großes Datendefizit besteht im Futterbau. Die Hauptursache dafür ist das Fehlen geeigneter Datenerfassungssysteme. Insbesondere für die Ermittlung der Arbeitszeiten und der lokalen Erträge stehen dem Landwirt derzeit keine brauchbaren Techniken zur Verfügung. Mit dem Satellitenortungs- und -navigationssystem GPS eröffnen sich neue Möglichkeiten zur automatisierten Datenerfassung.

Ausgehend von den bestehenden Defiziten war das Ziel der vorliegenden Arbeit eine automatisierte Erfassung von differenzierten Arbeitszeiten und lokalen Erträgen auf Basis der dynamischen Wägung. Als Versuchsmaschine wurde beispielhaft die Rundballenpresse ausgewählt, da sie eine zentrale Rolle auf Futterbaubetrieben spielt. Die praktische Umsetzung und Bewertung sollte über drei Teilziele erfolgen:

1. Aufbau eines Erfassungssystems mit GPS zur Ortung und Zeitgebung; Untersuchung der Ortungsgenauigkeit, Verfügbarkeit und Kontinuität im Langzeitversuch;
2. Erweiterung des Erfassungssystems und Sensorikergänzung zur Arbeitszeiterfassung an der Rundballenpresse; Entwicklung eines Computerprogramms zur Analyse der automatisiert erfaßten Daten;
3. Integration von Wägetechnik in die Rundballenpresse zur dynamischen Wägung; Ermittlung von Störgrößen und Untersuchung von Kompensationsmöglichkeiten; Berechnung lokaler Ertragswerte und Ertragskartierung.

Ortung mit GPS

Für die Ortung wurde der Schlepper mit zwei GPS-Empfängern unterschiedlicher Leistung ausgestattet, die Positionsermittlung erfolgte im differentiellen Betrieb (DGPS). Analysiert wurden Fahrten (von der Hofstelle zum selben Schlag und zurück) an 130 Tagen in den Monaten Mai bis November des Jahres 1994 und ein Einsatz der Rundballenpresse bei der Heuernte auf einer 1,5 ha großen Fläche im Jahr 1995.

Im Gegensatz zur Zeitgebung waren Einschränkungen und kurzzeitige Ausfälle bei der Ortung zu verzeichnen. Diese gingen vor allem auf die Abschattung der Signale unter

Bäumen auf einem Alleeteilstück der Strecke zurück. Ausfälle im Sekundenbereich wurden zwar durch Ausgleichsberechnungen des GPS-Empfängers überbrückt, diese führten aber an anderen Stellen zu höheren Ortungsfehlern.

Bei der Anzahl der erfaßten Satelliten bestand zwischen der Fahrt zum Schlag und zurück ein signifikanter Unterschied. Ursache dafür war das Losfahren des Schleppers vor Ausgabe der ersten neuen Position nach dem Einschalten des GPS-Empfängers. In den Monaten Juni und Juli wurden bei den Versuchen deutlich weniger Satelliten erfaßt als in den anderen Monaten des Untersuchungszeitraums. Hauptursache dafür war das Auftreten von systembedingten Phasen mit weniger Satelliten, deren Signale empfangen werden konnten.

Tendenziell nahmen die Ortungsfehler mit steigender Anzahl erfaßter Satelliten ab. Sie lagen beim leistungsschwächeren GPS-Empfänger überwiegend in einem Bereich von etwa 2 bis 50 m. Die Anzahl der Satelliten wirkte sich auch auf den Anteil der differentiellen Ortung im Echtzeitbetrieb aus: Bei einer geringeren Anzahl registrierbarer Satelliten waren öfters die zeitlichen Abstände zwischen den einzelnen Ausstrahlungen der Korrekturinformation zu groß, so daß die Ortung mit GPS nur im Standardmodus erfolgen konnte. Eine Abschattung der Signale des Funkgerätes der Feststation verhinderte auf der Allee ebenso die ständige Ortung im differentiellen Modus.

Der höherwertige GPS-Empfänger führte bei der Ortung zu einer deutlich besseren Genauigkeit. Nach der Positionsdatenkorrektur im Post Processing betrug die Restfehler weniger als $\pm 0,5$ m. Diese hohe Genauigkeit beruht auch auf der ausgereiften Post Processing-Software; mit einer Vorgängerversion lagen die Positionsfehler noch bei etwa ± 4 m.

Arbeitszeiterfassung

Zur automatisierten Ermittlung der Arbeitszeitdaten wurde die Hard- und Software des Erfassungssystems entsprechend erweitert. Das Kernstück bildete der GPS-Empfänger, der neben der Positionsermittlung auch für die Zeitmessung zuständig war. Die Erfassung lief mit Hilfe eines PC auf dem Schlepper ohne Zutun des Fahrers automatisiert ab.

Für die Analyse der Daten wurde das Programm *SATAZA* in der objektorientierten Programmiersprache *C++* entwickelt. Mit Hilfe des Moduls für die manuelle Auswertung konnten aus den Daten die Zeiten für Arbeits-/Prozeßelemente und Arbeitsarten schnell und benutzerfreundlich ermittelt werden. Eine wesentliche Grundlage hierfür ist die graphische Darstellung

des Fahrweges, der mit GPS festgestellt wurde. Die erzielbare Genauigkeit ist annähernd identisch mit der Genauigkeit der herkömmlichen manuellen Zeitermittlung mit der Stoppuhr. Bei der automatisierten Analyse mit *SATAZA* waren größere Zeitunterschiede zu den Referenzmessungen festzustellen. Bezogen auf die Gesamtzeit lagen sie zwischen 0 und etwa 3 %. Der Hauptgrund für die größeren Differenzen ist das Fehlen eines Algorithmus zur Erkennung des Rüstens auf dem Feld; dieser ist im Analyseprogramm noch nicht implementiert.

Mit *SATAZA* und der Fahrweganalyse konnten die wesentlichen Einflußfaktoren auf die Arbeitszeit ermittelt werden.

Dynamische Wägung und lokale Ertragsermittlung

Für die Versuche wurden die Achsstummel der Rundballenpresse mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) zur Ermittlung der Scherspannung versehen. An der Deichsel erfolgte eine Applikation von DMS zur Biege- und zur Scherspannungsmessung. Zusätzlich wurde in eine speziell konstruierte Anhängerkupplung eine Wägezelle zur Messung der Deichselstützlast integriert.

Während Verlagerungen der Zugöse im Zugmaul beim Einsatz der Anhängerkupplung mit der Wägezelle zu keinen Gewichtsfehlern führten, ergaben sich bei der Biegespannungsmessung und der Scherspannungsmessung in der Deichsel Abweichungen vom Sollwert von bis zu 25 bzw. 15 kg. Im Gegensatz zur Wägezelle zeigte die Gewichtsermittlung über die Scherspannungsmessung in der Deichsel auch eine lineare Abhängigkeit von der vom Schlepper ausgehenden Zugkraft: bei 5000 N betrug der Gesamtwägefehler etwa 30 kg.

Winkeländerungen zwischen Schlepper und Presse, wie sie bei Kurvenfahrten auftreten, führten beim Einsatz der Wägezelle zu keinerlei Auswirkungen auf den Gewichtswert.

Eine Verringerung der Größe der Reifenauflagefläche verfälschte die Gewichtswerte um bis zu 25 kg. Ebenso zeigte die Steigung der Auflagefläche Auswirkungen: Mit zunehmender Steigung erhöhte sich der Wägefehler und erreichte bei 20° einen Wert von etwa 25 kg.

Eine Abstützung der Pick-up auf dem Boden über die Stützräder führte zu Abweichungen von mehreren hundert Kilogramm vom Sollwert.

Zur Abschätzung der Gesamteinflußkraft der bisher aufgeführten (schwingungsfreien) Einflußgrößen wurden bei Fahrzeugstillstand Gewichtsmessungen nach Kurzfahrten auf einer Asphaltstraße und einer Wiese durchgeführt. Die ermittelten Wägefehler lagen auf der Asphaltstraße in einem Bereich von ± 4 kg, auf der Wiese war die Spannweite etwa viermal so groß.

Fahrbewegungen und rotierende oder translatierende Bauteile der Presse führten zu Störschwingungen, die die Gewichtsermittlung erheblich beeinträchtigten. Das Ergebnis einer Analyse des Frequenzspektrums der Gewichtssignale, die mit einer Aufzeichnungsrate von 200 Hz erfaßt wurden, zeigte Schwingungen vor allem im Bereich von 0 bis 10 Hz. Mit einer Tiefpaßfilterung oder einer Spline-Glättung konnten Abweichungen von ± 800 kg auf etwa ± 20 kg (2,5 %) und weniger verringert werden. Die noch vorhandenen Abweichungen gingen überwiegend auf schwingungsfreie Einflüsse zurück, die die Genauigkeit der Wägung in den Achsstummeln minderten.

Gewichtssignale und Beschleunigungswerte, die mit Beschleunigungssensoren an verschiedenen Stellen in der Rundballenpresse gemessen wurden, zeigten nur für die Achsstummel größere Korrelationen. Eine Verrechnung beider Signale zur Verbesserung der Wägewerte ist deshalb nicht sinnvoll.

Eine lokale Ertragsermittlung wurde auf einer Wiese mit 1,5 ha durchgeführt. Die Wägung der fertigen Heuballen im Stand mit der Wägezelle in der Anhängerkupplung und den DMS (Scherspannungsmessung) in den Achsstummeln führte zu Gewichtsfehlern von weniger als einem Prozent (durchschnittliches Ballengewicht: 375 kg). Bei einer zusätzlichen Feststellung der Ballenendgewichte auf Basis der dynamischen Gewichtswerte lagen die Abweichungen von den Sollwerten zwischen -16 und +5 %. Eine Ursache für die zu niedrigen Wägewerte lag in einem zu geringen Kalibrierungsfaktor. Zur Berechnung der lokalen Ertragswerte wurden die Durchsätze, abgeleitet von den dynamischen Gewichten, die Breiten der Ertragsbezugsflächen, bestimmt über den mit GPS ermittelten Fahrweg und die Fahrgeschwindigkeit, festgestellt mit SATAZA, herangezogen. Die lokalen Erträge der Wiese wurden in Form einer Rasterkarte und einer Isoertragslinienkarte dargestellt.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß das entwickelte System eine gute Basis für eine automatisierte Erfassung und Analyse von Arbeitszeit- und Ertragsdaten bildet. Für eine schnelle Umsetzung des Systems in eine praxistaugliche Lösung würde das Landwirtschaftliche Bus-System LBS eine große Hilfe darstellen.

9 Summary

Farmers frequently lack the detailed information about their enterprises which is necessary for economically and ecologically oriented management. An especially large deficiency exists for forage-growing farms. One main reason for this problem is inadequate data gathering systems, particularly systems for gathering the very significant information on working times and local yields. However, the GPS satellite positioning and navigation system provides a good basis for the development of automated data gathering systems.

An automated acquisition system which supplies detailed working data and local yields - based upon dynamic weighing - was realized. Because of its important role on forage-growing farms, a round baler pulled by a tractor served as the test machine. The new system was accomplished and tested by:

1. Building an acquisition system with GPS for positioning and timing and then investigating the long-term positioning accuracy, availability and continuity.
2. Extending the acquisition system and installing sensors for working time measurements on the round baler and then developing software for analyzing automatically-gathered data.
3. Developing a system for local yield mapping by integrating sensors on the round baler for dynamic weighing, investigating error sources and testing compensation methods, and developing calculations of local yield values and yield mapping.

Positioning with GPS

The tractor used for this work was equipped with two GPS receivers of different capabilities. Combined with a reference station that was set up, this allowed differential mode positioning (DGPS). Drives of the tractor from the farmstead to a field and back were monitored on 130 days from May to November in 1994. These drives and one operation of the round baler while baling 1.5 ha of hay in 1995 were selected for error analysis.

The two tested GPS receivers showed short-term positioning failures due to signal shading. The shading was caused by trees along a path which was part of the test course. The failures of only a few seconds were bridged by extrapolation. This procedure caused large positioning errors at other locations of the test course by one of the receivers.

The number of locked satellites was different on the test course between the drive from the farmstead to the field and the return drive due to tractor motion before the first position was determined by the GPS receiver. Less satellites were locked in June and July due to unfavorable satellite coverage.

The positioning errors had a tendency of decreasing with a raising number of locked satellites. The receiver with the lower performance had deviations of 2 to 50 m. Also, the number satellites locked affected the share of differential positioning in real time. During phases with lower numbers of locked satellites, the output rate of the used reference station for the differential signal decreased so much that the positioning of the tractor had to be carried out in stand-alone mode. In addition, occasional failures of the differential mode were caused by trees on the pass which shaded the signal from the radio at the reference station.

The locating errors were much smaller for the high performance receiver. After the differential correction with post processing the errors were less than ± 0.5 m. This high accuracy is based on the improved post processing software. Errors of up to ± 4 m occurred with an earlier release.

Working Time Measurement

The acquisition system was extended for the measurement of working times. The GPS supplied time as well as positioning. The data gathering proceeded automatically with the help of a heavy-duty PC on the tractor.

SATAZA, a software package written in the object oriented programming language C++, was developed for analyzing the data gathered. Times for work elements and kinds of work could be determined fast and user friendly with the manual analysis module. One main basis for this is the graphical presentation of the tractor track. The achievable accuracy is similar to the accuracy of the conventional manual time measurement method with stopwatches. SATAZA's automatic analysis leads to higher deviations. The time errors for the work

elements and kinds of work ranged from 0 to 3 % in relation to the total time. The main reason for the larger deviations is that there is no algorithm for detecting the preparation work.

All major influence factors for the working time could be determined with SATAZA and the tractor track analysis.

Dynamic Weighing and Local Yield Measurement

Strain gauges for detecting the shearing strain were applied on the axle of the round baler. Strain gauges also measured the shearing strain and the bending stress on the drawbar. A load cell, integrated into a special drawbar coupling, registered the drawbar load.

A displacement of the drawbar in the drawbar coupling caused no error with the load cell, but a deviation of 25 kg with the bending stress detection and 15 kg in the shearing strain measurement. In contrast to the load cell, the weight detection in the drawbar based on the shearing strain was affected by the pulling force. An increase in the pulling force of 1000 N caused a weighing error of approximately 5.5 kg.

A change of angle between the tractor and the round baler which occurs during turns, had no effect on the weight detection when the load cell was employed.

Errors of up to 25 kg were caused by a decrease of the tire bearing area. Also, an increase in the slope of the tire bearing led to deviations (25 kg with a 20° increase above horizontal).

If the pick-up was supported by its wheels on the ground, the detected weight showed a deviation of several hundred kilograms from the reference value.

For evaluating the total potential of the (nonoscillating) error parameters, the weight was measured when the baler was not moving after short drives in a meadow and on a asphalt road. Deviations of ± 4 kg could be observed on the asphalt road while they were about four times as high in the meadow.

Motions caused by driving and by moving part of the round baler considerably impair the weight detection. A frequency analysis of the weight signals sampled at 200 Hz revealed

oscillation mainly between 0 and 10 Hz. With a low pass filter or a spline, the deviations of ± 800 kg could be reduced to ± 20 kg (2.5 %) and less. The cause of these remaining errors are the above mentioned nonoscillating influences, which are affecting the weighing mainly in the axle.

Weight signals and acceleration data, measured at different locations on the round baler, showed high correlation only for the axle. Therefore, accuracy improvement for the weight values can not be gained with the acceleration information.

Local yield measurements were carried out on a meadow with 1.5 ha. The errors were less than 1 % (average bale weight: 375 kg) during static weighing of the finished bales with the load cell in the drawbar coupling and the shearing strain measurement in the axle. The weights of the finished bales, based on the dynamic data, showed errors from -16 to +5 %. One reason for the values in the negative range was a calibration factor which was too low. For calculating the local yields, the throughput rate (based on the dynamic weights), the working width (derived from the tractor tracks) and the driving speed (determined with SATAZA) were used. The local yields of the meadow could be presented with a raster and a contour map.

In summary it can be said, that the developed system provides a good basis for an automated gathering and an analysis of working times and local yields. A fast transfer of the system into a practical solution could be greatly supported by the Agricultural Bus-System (LBS).

10 Literatur

- [1] **Affi, A.A. und V. Clark:** Computer-aided multivariate analysis. New York: Van Nostrand Reinhold Company 1984
- [2] **Alsip, C. und J. Ellingson:** Computer correlation of soil color sensing with positioning for application of fertilizer and chemicals. In: Proceedings of the 1991 symposium "Automated agriculture for the 21st century". Chicago, IL, USA, December 16-17, 1991 St. Joseph, MI, USA: ASAE 1991, S. 317-325
- [3] **Anon.:** Kriterien für das dynamische Verhalten von Kraftmeßsystemen (Bestimmung der Eigenfrequenz). Meßtechnische Briefe der Hottinger Baldwin Meßtechnik 2 (1970), S. 46-47
- [4] **Anon.:** Definitionen für die Begriffe "Ortung und Navigation". Ortung und Navigation (1993), Nr. 1, S. 85-86
- [5] **Anon.:** EDV-Ackerschlagkartei. dlz 44 (1993), Nr. 4, S. 111-116
- [6] **Anon.:** Die Schlagkartei mit der Chipkarte füttern. profi (1993), Nr. 5, S. 64-66
- [7] **Anon.:** Düngerstreuer: Ausbringmenge per Gewicht steuern. profi (1995), Nr. 2, S. 8
- [8] **Anon.:** Ertragsmessung im Mährescher. Agrar-Übersicht (1995), Nr. 6, S. 21
- [9] **Anon.:** LBS-Computer jetzt serienreif. agrartechnik (1995), Nr. 11, S. 8
- [10] **Anon.:** GPS World Receiver Survey. GPS World 7 (1996), Nr. 1, S. 32-54
- [11] **Anon.:** GPS World Receiver Survey. GPS World 8 (1997), Nr. 1, S. 42-60
- [12] **Artmann, R., H. Speckmann und J. Robra:** Datenübertragung zwischen Traktor, Arbeitsgeräten und Betriebscomputer. Zielsetzung und Stand der Normung. Landtechnik 44 (1989), Nr. 10, S. 428-431
- [13] **Ashdown, M. und J. Schaller (Hrsg.):** Geographische Informationssysteme und ihre Anwendung in MBA-Projekten, Ökosystemforschung und Umweltbeobachtung / Geographic information systems and their application in MBA-projects, ecosystem research and environmental monitoring. Band 34; Bonn: UNESCO 1990
- [14] **Auernhammer, H.:** Eine integrierte Methode zur Arbeitszeitanalyse, Planzeiterstellung und Modellkalkulation landwirtschaftlicher Arbeiten, dargestellt an verschiedenen Arbeitsverfahren der Bullenmast. Dissertation: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1975
- [15] **Auernhammer, H.:** Arbeitszeitermittlung in der Landwirtschaft. Landtechnik (1979), Nr. 2, S. 95-97

- [16] **Auernhammer, H.:** Anforderungen an ein "Landwirtschaftliches Informations-System Landtechnik (LISL)". Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch 60 (1983), S. 512-519
- [17] **Auernhammer, H.:** Landwirtschaftliche Arbeitslehre - Manuskriptdruck der Vorlesung. Weihenstephan: Institut für Landtechnik 1986
- [18] **Auernhammer, H.:** Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung. Landtechnik 45 (1990), Nr. 7/8, S. 272-278
- [19] **Auernhammer, H.:** Elektronik in Traktoren und Maschinen. München: BLV Verlagsgesellschaft 1991
- [20] **Auernhammer, H.:** Kleinräumige Bestandesführung - Aktuelle Versuchsergebnisse. In: Arbeitspapier 210: Wettbewerbsfähige und umweltverträgliche Landwirtschaft; KTBL-Forum anlässlich der KTBL-Tage am 27. April 1994 in Würzburg/Veitshöchheim. Darmstadt: KTBL 1994, S. 73-80
- [21] **Auernhammer, H.:** Die Rolle von LISL in der Arbeitszeitkalkulation 2000. In: Agrartechnische Berichte Nr. 26: 10. Arbeitswissenschaftliches Seminar am 23. und 24. Oktober 1995. Hohenheim: Institut für Agrartechnik 1995, S. 35-46
- [22] **Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier und P. v. Perger:** Ortung und Ertragsermittlung beim Mähdrusch in den Erntejahren 1990 und 1991. Zeitschrift für Agrarinformatik 1 (1993), Nr. 1, S. 26-29
- [23] **Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier und K. Wild:** Yield measurements on combine harvesters. ASAE Paper 93-1506 (1993)
- [24] **Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier und K. Wild:** GPS for yield monitoring on combines. Computers and Electronics in Agriculture 11 (1994), Nr. 1, S. 53-68
- [25] **Auernhammer, H., M. Demmel, T. Muhr, J. Rottmeier und K. Wild:** Rechnergestützte Ertragsermittlung für eine umweltorientierte Düngung. In: Ackerbau unter veränderten Bedingungen - neue Techniken zur Kosteneinsparung. Landtechnik Schrift Nr. 4. Weihenstephan: Institut für Landtechnik 1994, S. 111-134
- [26] **Auernhammer, H., M. Demmel und P.J.M. Pirro:** Yield measurement on self propelled forage harvesters. ASAE Paper 95-1757 (1995)
- [27] **Auernhammer, H., M. Demmel und H. Stanzel:** Wiegemöglichkeiten in der Schlep dreipunkthydraulik. Landtechnik 43 (1988), Nr. 10, S. 414-418
- [28] **Auernhammer, H. und T. Muhr:** GPS in a basic rule for environment protection in agriculture. In: Proceedings of the 1991 symposium "Automated agriculture for the 21st century". Chicago, IL, USA, December 16-17, 1991 St. Joseph, MI, USA: ASAE 1991, S. 394-402

- [29] **Auernhammer, H., T. Muhr und M. Demmel:** Ortungssysteme für die Landwirtschaft im Vergleich. In: Landtechnik 1993: Kurzfassung der Vorträge vom 28./29. Oktober in Braunschweig. Düsseldorf: VDI, VDI-Gesellschaft Agrartechnik, Max-Eyth-Gesellschaft für Agrartechnik 1993, S. 146-148
- [30] **Auernhammer, H., T. Muhr und M. Demmel:** Vierjährige Einsatzenerfahrung mit GPS und DGPS. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz Sonderheft XIV (1994), S. 133-142
- [31] **Auernhammer, H. und E. Nacke** (Hrsg.): Arbeitszeitkalkulationen in der Landwirtschaft mit dialogfähigen EDV-Programmen an Groß- und Kleinrechnern. Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan, Nr. 8. Weihenstephan: Institut für Landtechnik 1981
- [32] **Auernhammer, H. und J. Rottmeier:** Ermittlung der Arbeitszeitbedarfes auf neuen Wegen. Landtechnik 45 (1990), Nr. 4, S. 161-163
- [33] **Auernhammer, H. und J. Rottmeier:** Stationäre Waagen. Landtechnik 50 (1995), Nr. 1, S. 20-21
- [34] **Auernhammer, H. und H. Schön:** Terminologie für die Arbeitszeiterfassung und Planzeiterstellung im Landbau. Landtechnik 32 (1977), Nr. 1, S. 27-30
- [35] **Avionik Zentrum Braunschweig:** Deutscher Funknavigationsplan 1996. Schlußbericht des Forschungsvorhaben Nr. L-2/95-50137/95 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr. Braunschweig: Avionik Zentrum Braunschweig 1996
- [36] **Bachmann, P.:** Handbuch der Satellitennavigation. Stuttgart: Motorbuch Verlag 1993
- [37] **Bao, S., M.S. Henry, K.R. Brooks und D. Barkley:** Integrating spatial statistics into GIS. ASAE Paper 94-3547 (1994)
- [38] **Bauer, M.:** Vermessung und Ortung mit Satelliten: NAVSTAR-GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme. Karlsruhe: Wichmann Verlag 1992
- [39] **Bergeijk, J. van, D. Goense und L.G. Willenburg:** Dynamic weighing for accurate fertilizer distribution. In: AGENG Madrid 96, International Conference on Agricultural Engineering, Madrid 23/26 September, 1996: EurAgEng 1996, Volume 1, S. 217-218
- [40] **Beunk, H.:** Was bringt der Bordcomputer? profi (1993), Nr. 4, S. 64-66
- [41] **Biller, R.H.:** Aufbau und Einsatz eines Datenerfassungssystems für Ackerschlepper. Grundlagen der Landtechnik 35 (1985), Nr. 4, S. 97-104
- [42] **Blanchard, W.F.:** Introduction to satellite navigation. International Journal of Satellite Navigations 12 (1994), S. 421-426
- [43] **BLH SR-4 Sensoren GmbH** (Hrsg.): T-Design - Handbuch für die Software zur Berechnung von DMS-Sensoren. Heilbronn: BLH 1995

-
- [44] **Böckl, M.:** Ermittlung vereinfachter Arbeitszeitbedarfsfunktionen für die Feldarbeit aus computergestützten Arbeitstagebuchaufzeichnungen. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1988
- [45] **Böttiger, S.:** Technische Realisierung eines modular aufgebauten Informations- und Kommunikationssystems für die Landwirtschaft. In: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI - Landtechnik 1996 Tagung Berlin, 10. und 11. Oktober. Düsseldorf: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, VDI-Verlag 1996, S. 201-203
- [46] **Borland International:** Turbo Pascal 6.0 user's guide. Scotts Valley, CA, USA: Borland International 1990
- [47] **Brunner, H.:** Ergebnisse einer Umfrage zur mobilen Elektronik in der Außenwirtschaft. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1991
- [48] **Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten:** Agrarbericht 1994. Bonn: Bundesverlagsgesellschaft 1994
- [49] **Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten:** Agrarbericht 1996. Bonn: Bundesverlagsgesellschaft 1996
- [50] **Burgess, T.M. und R. Webster:** Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. II Block kriging. Journal of Soil Science 31 (1980), S. 333-341
- [51] **Campbell, R.H., S.E. Rawlins und S. Han:** Monitoring methods for potato yield mapping. ASAE Paper 94-1584 (1994)
- [52] **Choi, C.H., D.C. Erbach und R.J. Smith:** Navigational tractor guidance system. Transactions of the ASAE 33 (1990), Nr. 3, S. 699-706
- [53] **Clark, I.:** Practical geostatistics. London: Applied Science Publishers 1979
- [54] **Clark, R.L. und J.W. Worley:** Accuracy of DGPS position information from land based moving vehicles with a C/A code GPS receiver. ASAE Paper 94-3545 (1994)
- [55] **Cole, D.J. und D. Cebon:** Performance and application of a capacitive strip tyre force sensor. In: Road Traffic Monitoring and Control. London, England, April 28-30, 1992 Stevenage, England: IEE 1992, S. 123-127
- [56] **Colijn, H.:** Weighing and proportioning of bulk solids. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications 1983
- [57] **Cooke, R.A., S. Mostaghimi und C.D. Heatwole:** Statistical/geostatistical analysis of field data. ASAE Paper 91-2574 (1991)
- [58] **Cressie, N.A.C.:** Statistics for spatial data. New York: John Wiley & Sons 1991
- [59] **Czichos, H.:** Hütte - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1989

- [60] **Dehmel, G. und H. Heller:** Neun Schlagkarteien im großen DLG-Test. DLG-Mitteilungen 108 (1993), Nr. 11, S. 66-69
- [61] **Delcourt, H. und J. De Baerdemaeker:** Soil nutrient mapping implications using GPS. Computers and Electronics in Agriculture 11 (1994), Nr. 1, S. 37-51
- [62] **Demmel, M., T. Muhr, J. Rottmeier, P. von Perger und H. Auernhammer:** Ortung und Ertragsermittlung beim Mähdrusch in den Erntejahren 1990 und 1991. In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge". Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Agrartechnik 1994, Heft 14, S. 107-122
- [63] **Deutsches Institut für Normung:** DIN 1305: Masse, Wägewert, Kraft, Gewichtskraft, Gewicht, Last. 1988
- [64] **Dittrich, J., E. Kühmstedt und R.-P. Andreß:** Langwellen-Real-Time-Differential-GPS zur Lösung von Navigations- und Ortungsaufgaben. In: DGON Seminar SATNAV 95 Satellitennavigationssysteme - Grundlagen und Anwendungen. 9.-12. Oktober 1995 in Freising-Weißenstephan. Düsseldorf: Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. 1995, S. 249-250
- [65] **Doluschitz, R., C. Fuchs und B. Schanzenbächer:** EDV-Ackerschlagkarteien zur Unterstützung eines umweltorientierten Managements in Ackerbaubetrieben. Zeitschrift für Agrar informatik 1 (1993), Nr. 4, S. 74-85
- [66] **Ehlert, D. und P. Jürschik:** Satellitenortung in der agrartechnischen Forschung. Landtechnik 48 (1993), Nr. 4, S. 182-184
- [67] **Ehlert, D. und H. Schmidt:** Ertragskartierung mit Feldhäckslern. Landtechnik 50 (1995), Nr. 4, S. 204-205
- [68] **Eliason, M., D. Heaney, T. Goddard, M. Green, C. McKenzie, D. Penney, H. Gehue, G. Lachapelle und M.E. Cannon:** Yield measurement and field mapping with an integrated GPS system. In: Proceedings of Site-Specific Management for Agricultural Systems, Second International Conference in Minneapolis, MI, USA, March 27-30, 1994. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America 1995, S. 49-58
- [69] **Englund, E. und A. Sparks:** GEO-EAS 1.2.1: Geostatistical environmental assessment software user's guide. Las Vegas, Nevada: Environmental Monitoring Systems Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency 1991
- [70] **Environmental Systems Research Institute:** Understanding GIS - The ARC/INFO Method. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute 1991
- [71] **Evans, R.G., S. Han und S.L. Rawlins:** GIS capabilities and limitations for precision farming. ASAE Paper 95-3236 (1995)

- [72] **Faul, M. und E.D. Gilles:** DGPS zur automatischen Schiffsführung auf Binnenwasserstraßen. In: DGON Seminar SATNAV 95 Satellitennavigationssysteme - Grundlagen und Anwendungen. 9.-12. Oktober 1995 in Freising-Weihenstephan. Düsseldorf: Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. 1995, S. 167-176
- [73] **Fichtel, H. und O. Balcarek:** Vergleichende Untersuchungen von Radargeräten zur Geschwindigkeitsmessung an Landmaschinen. Landtechnik 36 (1986), Nr. 3, S. 68-73
- [74] **Friedrich, L.:** Ortungsverfahren für landwirtschaftliche Fahrzeuge. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1992
- [75] **Fulda, E.:** Überlegungen und Vordrucke zur Arbeitstagebuchführung. Landtechnik (1979), Nr. 1, S. 41-43
- [76] **Gautz, L.D., W.J. Chancellor und J.W. Rumsey:** Location the tractor on the farm using electronic gates. ASAE Paper 88-1059 (1988)
- [77] **GPS-Informations- und Beobachtungssystem (GIBS):** Satellitenbeobachtungsdaten der Beobachtungsstation Wetzlar/Bayerischer Wald des Jahres 1994. Abgerufen vom GIBS-Internet-Server. Frankfurt/Main: GIBS 1994
- [78] **GPS-Informations- und Beobachtungssystem (GIBS):** GPS constellation history and status (status as of 16. August 1996). Frankfurt/Main: GIBS 1996
- [79] **Graff, M. und T. Engel:** Anforderungen an die Informationstechnik und Lösungsansätze. In: KTBL Arbeitspapier 214: Technik für die kleinräumige Bestandesführung, Ziele-Entwicklungsstand-Forschungsbedarf; ATB/KTBL-Kolloquium am 13./14. April 1994 in Potsdam-Bornim. Darmstadt: KTBL 1994, S. 75-82
- [80] **Hagerer, P.-G.:** Entwicklung eines videomeßtechnischen Verfahrens für Analysen der informatorischen Belastung. Dissertation: Abteilung für Arbeitswissenschaft des Fachbereiches Agrarwissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen 1985
- [81] **Haidn, B.:** Einsatz der Videotechnik zur Ermittlung des Einflusses von Zeitnehmern auf den Arbeitszeitaufwand in der Zuchtsauenhaltung. In: Proceedings of the XXIVth CIOSTA-CIGR V Congress, August 27 - 30, 1990. Helsinki, Finnland: Work Efficiency Institute 1990, S. 335-341
- [82] **Haidn, B.:** Arbeitswirtschaftliche Untersuchungen und Modellkalkulationen in der Zuchtsauenhaltung. Dissertation: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1992
- [83] **Hammer, W.:** Arbeitszeitbedarfskalkulation. Landbauforschung Völkenrode 42 (1992), S. 156-164
- [84] **Han, S. und C.E. Goering:** A field information system for site-specific crop management. ASAE Paper 92-3608 (1992)
- [85] **Han, S., J.W. Hummel, C.E. Goering und M.D. Cahn:** Cell size selection for site-specific crop management. Transactions of the ASAE 37 (1994), Nr. 1, S. 19-26

- [86] **Han, S., S.L. Rawlins, R.H. Campbell und R.G. Evans:** A bitmap method for determining harvest width in yield mapping. ASAE Paper 95-1333 (1995)
- [87] **Hankemeier, P. und A. Müller:** GPS-Augmentation: State of the Art. In: DGON Seminar SATNAV 95 Satellitennavigationssysteme - Grundlagen und Anwendungen. 9.-12. Oktober 1995 in Freising-Weihenstephan. Düsseldorf: Deutsche Gesellschaft für Ortung und Navigation e.V. 1995, S. 31-40
- [88] **Harasim, A.:** Statik: Grafische Statik und Trägerlehre. Würzburg: Vogel Verlag 1991
- [89] **Harrison, J.D., S.J. Birrell, K.A. Sudduth und S.C. Borgelt:** Global positioning system applications for site-specific farming research. ASAE Paper 92-3615 (1992)
- [90] **Hoffmann, K.:** Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Meßfehlern beim Messen mit Dehnungsmeßstreifen (Broschüre VD 78001). Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH 1978
- [91] **Hofffeld, B.:** Absehbare Entwicklungen bei GPS und rechtliche Voraussetzungen. In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge". Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Agrartechnik 1992, Heft 14, S. 77-81
- [92] **Hubrich, S.:** Geographische Informationssysteme besser nutzen. Neue Landwirtschaft (1995), Nr. 11, S. 34
- [93] **Hurn, J.:** GPS: a guide to the next utility. Sunnyvale, CA, USA: Trimble Navigation 1989
- [94] **Hurn, J.:** Differential GPS explained. Sunnyvale, CA, USA: Trimble Navigation 1993
- [95] **Ishkhanov, I.A.:** Some dynamic errors in weighing during motion. Measurement Techniques (English translation of Izmeritel'naya Tekhnika) 28 (1985), S. 36-39
- [96] **Izadmehr, B. und C.E. Lee:** Accuracy and tolerances of weigh-in-motion systems. Transportation Research Record (1987), S. 127-135
- [97] **Jürschik, P.:** Multifunktionseller Einsatz des AgroCom-Terminals ACT in der teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. In: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI - Landtechnik 1996 Tagung Berlin, 10. und 11. Oktober. Düsseldorf: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, VDI-Verlag 1996, S. 189-192
- [98] **Jungerberg, H.:** Ein Beitrag zur experimentellen und numerischen Simulation von Traktorschwingungen. In: Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984, Reihe 14, Nr. 26
- [99] **Kahlmeyer, E.:** Stahlbau: Träger - Stützen - Verbindungen. Düsseldorf: Werner-Verlag 1990
- [100] **Klemme, K.A., D.P. Froehlich und J.A. Schumacher:** Spatially variable technology for crop yield. ASAE Paper 92-1543 (1992)

-
- [101] **Kloepfer, F., D. Murphy und E. Schnug:** Ertragskartierung zur gezielteren Düngung. Landtechnik 47 (1992), Nr. 4, S. 177-178
- [102] **Kochsiek, M.:** Handbuch des Wägens. Braunschweig: Vieweg-Verlag 1989
- [103] **Kohnen, G.:** GPS Ortungs- und Navigationsgenauigkeit mit differentieller Korrektur über RDS. Landtechnik 51 (1996), Nr. 4, S. 233-234
- [104] **Krahl, T.:** Marktübersicht: Schnellbestimmer für Materialfeuchte und Wassergehalt. MSR Magazin (1994), Nr. 3, S. 8-11
- [105] **Krüger, G., R. Springer und W. Lechner:** Global navigation satellite systems (GNSS). Computers and Electronics in Agriculture 11 (1994), Nr. 1, S. 3-21
- [106] **Kumm, W.:** Global Positioning System: GPS. Bielefeld: Klasing 1993
- [107] **Landmaschinen- und Ackerschlepper-Vereinigung (LAV)** (Hrsg.): LBS - Das Landwirtschaftliche Bus-System. Frankfurt am Main: LAV 1997
- [108] **Langley, R.B.:** Innovation: Time, clocks, and GPS. GPS World 2 (1991), Nr. 10, S. 38-42
- [109] **Larsen, W.E., G.A. Nielsen und D.A. Tyler:** Precision navigation with GPS. Computers and Electronics in Agriculture 11 (1994), Nr. 1, S. 85-95
- [110] **Lipman, A.E., Y.N. Okrent und S.A. Bublik:** Improved signal averaging performance in a weighing system. Measurement Techniques (English translation of Izmeritel'naya Tekhnika) 31 (1988), S. 432-434
- [111] **Lynn, P.A.:** An introduction to the analysis and processing of signals. New York, N.Y., USA: Hemisphere Publishing Corporation 1989
- [112] **Mack, G.:** Precise positioning for agriculture. In: Precision Agriculture'97, Papers presented at the First European Conference on Precision Agriculture at Warwick University Conference Centre, 7-10 September 1997. Oxford: BIOS Scientific Publishers 1997, Volume II: Technology, IT and Management, S. 593-602
- [113] **Macy, T.S., D.L. Thackery und N. Cox Macy:** Yield monitoring experiences 1994. ASAE Paper 94-1581 (1994)
- [114] **Maidl, F.X., R. Brunner, E. Sticksel und G. Fischbeck:** Ursachen kleinräumiger Ertragsschwankungen im bayerischen Tertiärhügelland und Folgen für eine teilschlagbezogenen Düngung. Pflanzenernährung und Bodenkunde (1998), In Druck
- [115] **Maier, S.:** Kontinuierliche Feuchtemessung in landwirtschaftlichen Erntemaschinen. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1993
- [116] **Muhr, T.:** Vergleich von berührungslos arbeitenden Geschwindigkeitssensoren für die Landwirtschaft. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1989

- [117] **Muhr, T. und H. Auernhammer:** Technische Möglichkeiten zur Ortung landwirtschaftlicher Fahrzeuge im Feld. In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge". Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Agrartechnik 1992, Heft 14, S. 49-56
- [118] **Muhr, T., H. Auernhammer, M. Demmel, C. Seebauer und R. Weigel:** Dead reckoning as backup for DGPS-systems in agriculture. ASAE Paper 95-1749 (1995)
- [119] **Muhr, T., H. Auernhammer, M. Demmel und K. Wild:** Inventory of fields and soils with DGPS and GIS for precision farming. ASAE Paper 94-1583 (1994)
- [120] **Newton, W.H.:** Trials of three on-board axle weighing systems for heavy goods vehicles. Research Report 103. Crowthorne, Berkshire, GB: Transport and Road Research Laboratory (Department of Transport) 1987
- [121] **Nolan, S.C., G.W. Haverland, T. Goddard, M. Green, D. Penney, J.A. Henriksen und G. Lachapelle:** Building a yield map from geo-referenced harvest measurements. In: Proceedings of the Third International Conference on Precision Agriculture in Minneapolis, MI, USA, June 23-26, 1996. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America 1996, S. 885-892
- [122] **Nord, O.:** Zeitmessungen mit dem Tonband. Landarbeit und Technik (1968), S. 83-91
- [123] **Norden, K.E.:** Electronic weighing: fundamentals and applications. Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann Ltd. 1993
- [124] **Öhlmér, B.:** Informationstechnologie und Unterstützungsbedarf in der Landwirtschaftlichen Betriebsführung. Zeitschrift für Agrarinformatik 2 (1994), Nr. 1, S. 1-2
- [125] **Ordolff, D.:** Aufzeichnungen von Arbeitsabläufen auf Magnetband. In: Proceedings of the VII CIGR-Congress, Baden-Baden, Doc. 2. 1969, S. 117-126
- [126] **O'Sullivan, J.A.:** Evaluation of a Polaroid ultrasonic proximity transducer. Journal of Agricultural Engineering Research 34 (1986), Nr. 1, S. 63-73
- [127] **Otani, R., K. Nishizaki, Y. Shibata, K. Susawa und K. Tamaki:** Weighing system using tractor-mounted front-end loader. In: Proceedings of the XII World Congress on Agricultural Engineering, Milano, August 29 - September 1, 1994. Merelbeke, Belgium: CIGR 1994, Volume 2, S. 1131-1135
- [128] **Palmer, R.J.:** Progress report of a local positioning system. In: Proceedings of the 1991 symposium "Automated agriculture for the 21st century". Chicago, IL, USA, December 16-17, 1991. St. Joseph, MI, USA: ASAE 1991, S. 403-408
- [129] **Papoulis, A.:** Signal analysis. New York: McGraw-Hill 1977
- [130] **Paul, W. und H. Speckmann:** Überblick über grundsätzliche Einsatzmöglichkeiten von Mikroelektronik-Sensoren in der Landtechnik. Grundlagen der Landtechnik 33 (1983), Nr. 5, S. 153-159

-
- [131] **Pierce, F.J., N.W. Anderson, T.S. Colvin, J.K. Schueller, D.S. Humburg und N.B. McLaughlin:** Yield mapping. In: The state of site-specific management for agriculture. Wisconsin, MA, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America 1997, S. 211-243
- [132] **Potma, T.:** Dehnungsmessstreifen-Messtechnik. Hamburg: Deutsche Philips GmbH 1968
- [133] **Pringle, J.L., M.D. Schrock, R.T. Hinnen, K.D. Howard und D.L. Howard:** Yield variation in grain crops. ASAE Paper 93-1505 (1993)
- [134] **Raby, P. und P. Daly:** Integrated GPS/GLONASS navigation: algorithms and results. International Journal of Satellite Navigations 12 (1994), S. 443-451
- [135] **REFA:** Methodenlehre des Arbeitsstudiums - Teil 2: Datenermittlung. München: Carl Hanser Verlag 1971
- [136] **REFA (Hrsg.):** REFA-Buch Landwirtschaft - Teil 1: Methoden des Arbeitsstudiums im Landbau. Darmstadt: REFA 1984
- [137] **Reiner, L.:** Bauernhof 2000 - integrierter Pflanzenbau mit Software und Sensoren. In: Integrierte Systeme, 8. Jahrestagung der GIL in Weihenstephan Oktober 1987. Agrar-informatik - Informationsverarbeitung Agrarwissenschaft. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer 1987, Band 13, S. 8-19
- [138] **Reiner, L. und H. Friedrich:** Zielsetzung der Elektronik im Pflanzenbau - Pflanzenbauliche Aspekte. In: KTBL Arbeitspapier 175: Elektronikeinsatz in der Außenwirtschaft. Darmstadt: KTBL 1994, S. 22-27
- [139] **Reitz, P.:** Ertragskartierung. Grundlagen der Landtechnik 47 (1992), Nr. 6, S. 273-276
- [140] **Reitz, P. und H.D. Kutzbach:** Technische Komponenten für die Erstellung von Ertragskarten während der Getreideernte mit dem Mähdrescher. In: VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge". Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Agrartechnik 1992, Heft 14, S. 91-105
- [141] **Reitz, P. und H.D. Kutzbach:** Data acquisition for yield mapping with combine harvesters. In: Computers in agriculture 1994. Proceedings of the 5th international conference held in Orlando, Florida, USA, 6-9 February 1994. St. Joseph, MI, USA: American Society of Agricultural Engineers 1994, S. 42-47
- [142] **Ren, J., N.L. Buck und S.L. Spahr:** A dynamic weight logging system for dairy cows. Transactions of the ASAE 35 (1992), Nr. 2, S. 719-725
- [143] **Rettig, H., H. Schmidt und Hans-F. Müller:** Feuchtebestimmung von Halmgut in Erntemaschinen. Grundlagen der Landtechnik 47 (1992), Nr. 6, S. 288-291
- [144] **Rohrbach, C. (Hrsg.):** Handbuch der experimentellen Spannungsanalyse. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989

- [145] **Rottmeier, J.:** Statische und dynamische Gewichtsermittlung in Fahrzeugen und Maschinen zur Futterernte. Dissertation: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1996
- [146] **Rottmeier, J., H. Auernhammer und H. Stanzel:** Elektronikeinsatz in der Landtechnik zur Verringerung des Düngemittelaufwandes und der Umweltbelastung im Futterbau. Berichte aus dem Institut für Landtechnik. Weihenstephan: Landtechnik Weihenstephan 1989/1990
- [147] **Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)** (Hrsg.): RTCM standards for differential NAVSTAR GPS service. RTCM Paper 134-89/SC104-68. Washington, D.C., USA: RTCM 1989
- [148] **Sachs, L.:** Angewandte Statistik. Berlin: Springer Verlag 1992
- [149] **Sauer, H.:** Arbeitswissenschaftliche Untersuchungen und Methodenprüfung durch Modellkalkulationen in der Milchviehhaltung. Dissertation: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1981
- [150] **Schick, M.:** Methodik der Arbeitszeiterfassung am Beispiel Berglandwirtschaft. In: Agrartechnische Berichte Nr. 26: 10. Arbeitswissenschaftliches Seminar am 23. und 24. Oktober 1995. Hohenheim: Institut für Agrartechnik 1995, S. 139-146
- [151] **Schneider, F.:** Der Arbeitszeitaufwand in EDV-Schlagkarteien. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1990
- [152] **Schneider, H. und P. Reitz:** GPS zur Geschwindigkeitsmessung. Landtechnik 51 (1996), Nr. 5, S. 264-265
- [153] **Schnug, E., S. Haneklaus und J. Lamp:** Economic and ecological optimization of farm chemical application by "Computer Aided Farming (CAF)". In: Technical Abstracts and Poster Abstracts on International Conference on Agricultural Engineering (AG ENG '90). Berlin: VDI-AGR/MEG 1990, S. 161-162
- [154] **Schnug, E., D. Murphy, E. Evans, S. Haneklaus und J. Lamp:** Yield mapping and application of yield maps to computer-aided local resource management. In: Proceedings of Soil Specific Crop Management, April 14-16 1992, Minneapolis, MN, USA. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy 1993, S. 87-93
- [155] **Schön, H.:** Wettbewerbsfähige und umweltschonende Landbewirtschaftung - eine Herausforderung für die Landtechnik und Landwirtschaft. In: Arbeitspapier 210: Wettbewerbsfähige und umweltverträgliche Landwirtschaft; KTBL-Forum anlässlich der KTBL-Tage am 27. April 1994 in Würzburg/Veitshöchheim. Darmstadt: KTBL 1994, S. 7-28
- [156] **Schön, H., H. Auernhammer, T. Muhr, M. Demmel und H. Stanzel:** Positionsbestimmung landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen für die Entwicklung ökologisch optimierter Anbauverfahren. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 1994

-
- [157] **Schönfelder, G. und H. Niproschke:** Bestimmung der Bestandshöhe beim Mähdrusch. *Landtechnik* 49 (1994), Nr. 3, S. 160-161
- [158] **Schollen, F.-P.:** Mobile Bordcomputer: Was sie können, was sie kosten. *top agrar* (1992), Nr. 4, S. 108-109
- [159] **Schröter, G. (Hrsg.):** Eichgesetz und Waagen - Ein Leitfaden. Gießen: Mettler Instrumente GmbH 1990
- [160] **Schrüfer, E.:** Signalverarbeitung: Numerische Verarbeitung digitaler Signale. München; Wien: Carl Hanser Verlag 1990
- [161] **Schueller, J.K. und Y.H. Bae:** Spatially attributed automatic combine data acquisition. *Computers and Electronics in Agriculture* 2 (1987), S. 119-127
- [162] **Schueller, J.K., S.C. Borgelt, S.W. Searcy, B.A. Stout und H. Bae Yeong:** Mapping of spatially variable yield during grain combining. *Transactions of the ASAE* 32 (1989), Nr. 3, S. 826-829
- [163] **Schueller, J.K., S. Borgelt und K. Wild:** Ortung und Navigation in der Landwirtschaft der USA - Stand und Ausblick. In: *VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik "Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge"*. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Agrartechnik 1992, Heft 14, S. 183-189
- [164] **Schurig, M. und O. Zirngibl:** Trocknungsverlauf von Grüngut bei Verwendung unterschiedlicher Aufbereitungstechnik. Unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse. Weihenstephan: Institut für Landtechnik 1994
- [165] **Schuster, A.:** Industrielle Wägetechnik. Darmstadt: Carl Schenk AG 1983
- [166] **Seebauer, C.:** Untersuchungen zur Signalabschattung bei Einsatz eines differenziellen globalen Positionierungssystems in der Landwirtschaft. Diplomarbeit: Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik und Institut für Landtechnik der Technischen Universität München 1995
- [167] **Shalevoi, V.M.:** Strain-gauge weighing on board a ship on a rough sea. *Measurement Techniques (English translation of Izmeritel'naya Tekhnika)* 31 (1988), S. 435-438
- [168] **Sonck, B. und M. van der Schilden:** Labour time studies in agriculture: from element times to task times using hand-held computers. In: *Proceedings of the XII World Congress on Agricultural Engineering, Milano, August 29 - September 1, 1994*. Merelbeke, Belgium: CIGR 1994, Volume 2, S. 1402-1411
- [169] **Spieß, B.:** Automatisierte Arbeitszeiterfassung beim Mähdrusch. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1994
- [170] **Spinnler, R.:** Untersuchungen über Wiegemöglichkeiten in der Dreipunkthydraulik. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1987

- [171] **Stafford, J.V. und B. Ambler:** Dynamic location for spatially selective field operations. ASAE Paper 91-3528 (1991)
- [172] **Stanzel, H.:** Sensoren zur Gewichtsermittlung. In: Wiegemöglichkeiten im Schlepperheckkraftheber und in Transportfahrzeugen, Schriftenreihe der Landtechnik Weihenstephan, Nr. 2. Weihenstephan: Institut für Landtechnik 1990, S. 19-26
- [173] **Stott, B.L., S.C. Borgelt und K.A. Sudduth:** Yield determination using an instrumented Claas combine. ASAE Paper 93-1507 (1993)
- [174] **Stroustrup, B.:** C++. Bonn: Addison-Wesley 1987
- [175] **Tevis, J.W., A.D. Whittaker und D.J. McCauley:** Efficient use of data in the kriging of soil pH. ASAE Paper 91-7047 (1991)
- [176] **Theiß, D.:** Die Wägezelle: Vom Wägegut zum Meßsignal. In: Industrielle Wägetechnik. Darmstadt: Carl Schenk AG 1983, S. 21-36
- [177] **Thomas, C.:** Berührungslos arbeitende Abstandssensoren in der Landtechnik. Grundlagen der Landtechnik 34 (1984), Nr. 3, S. 125-132
- [178] **United States Naval Observatory (USNO):** Archive of notice advisories to NAVSTAR users (NANUs) for 1994. Washington, D.C.: USNO 1994
- [179] **Vansichen, R. und J. De Baerdemaeker:** Continuous wheat yield measurements on a combine. In: Proceedings of the 1991 symposium "Automated agriculture for the 21st century". Chicago, IL, USA, December 16-17, 1991 St. Joseph, MI, USA: ASAE 1991, S. 346-355
- [180] **Vansichen, R. und J. De Baerdemaeker:** Measuring the actual cutting width of a combine by means of an ultrasonic distance sensor. In: Trends in agricultural engineering. Prague, CSFR, 15-18 September 1992 Prague: University of Agriculture Prague - Faculty of Agricultural Engineering 1992, Proceedings II., S. 615-621
- [181] **Vansichen, R. und J. De Baerdemaeker:** A measurement technique for yield mapping of corn silage. Journal of Agricultural Engineering Research 55 (1993), Nr. 1, S. 1-10
- [182] **Vickers (Hrsg.):** Mobile Hydraulics Manual M-2990-A. Troy, MI, USA: Vickers Incorporated 1979
- [183] **Wagner, L.E. und M.D. Schrock:** Field experiences with LORAN-C for positioning agricultural machinery. ASAE Paper Mid-Central Region 86-1581 (1986)
- [184] **Wendeborn, J.O.:** Die Unebenheiten landwirtschaftlicher Fahrbahnen als Schwingungserreger landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Grundlagen der Landtechnik 15 (1965), Nr. 2, S. 33-46

- [185] **Whitehead, D.G., A.R. Fleming, I.M. Bell und A. Pugh:** Dynamic weighing in a hostile environment. Transactions of the Institute of Measurement and Control 11 (1989), S. 163-168
- [186] **Wild, K.:** Systematische Untersuchungen zur Gewichtsermittlung im Schlepperheckkraftheber. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik Weihenstephan 1991
- [187] **Wild, K. und H. Auernhammer:** Automatisierte Prozeßdatenerfassung in Erntemaschinen. In: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI - Landtechnik 1995 Tagung Braunschweig, 12. und 13. Oktober. Düsseldorf: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, VDI-Verlag 1995, S. 233-236
- [188] **Wild, K., G. Rödel und M. Schurig:** Bodenbeprobung mit Bohrschecke, GPS-Ortung und Schnellbestimmung von Nitratstickstoff. In: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI - Landtechnik 1996 Tagung Berlin, 10. und 11. Oktober. Düsseldorf: Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI, VDI-Verlag 1996, S. 181-184
- [189] **Wowk, V.:** Machinery vibration. New York, N.Y., USA: McGraw-Hill 1991

Software

- Ashtech:** *GPS Multi-Site Mission Planning*, Version 3.0, Sunnyvale, CA, USA, 1993
- Ashtech:** *PPDIFF*, Version 4.5.00, Sunnyvale, CA, USA, 1991
- Ashtech:** *PPDIFF-PNAV*, Version 2.1.04P, im Programm *PRISM*, Version 2.1, Sunnyvale, CA, USA, 1996
- Autodesk:** *AutoCad*, Version 12, San Raffael, CA, USA, 1993
- Borland International:** *C++*, Version 3.1, Scotts Valley, CA, USA, 1992
- Carlson, E. und T. Vincenty:** *UTMS*, Version 2.0, 1993
- Environmental Systems Research Institute:** *PC ARC/INFO*, Version 3.4 D, Redlands, CA, USA, 1990
- Gesellschaft für Strukturanalyse (Gfs):** *DIA*, Version 5.0, Aachen, 1994
- Golden Software:** *Surfer*, Version 6.03, Golden, CO, USA, 1996
- Laboratory Technology Corporation:** *Labtech Notebook*, Version 7.3, Wilmington, WA, USA, 1992
- Microsoft:** *C*, Version 5.1 und 6.0, Redmond, WA, USA, 1989 und 1990
- Microsoft:** *Excel*, Version 5.0, Redmond, WA, USA, 1994
- Microsoft:** *Windows*, Version 3.11, Redmond, WA, USA, 1993
- SAS Institute Corporation:** *SAS*, Version 6.11, Cary, NC, USA, 1996