

Institut für Landtechnik
der Technischen Universität München
in Weihenstephan

Statische und dynamische Gewichtsermittlung in Fahrzeugen und Maschinen zur Futterernte

Josef Rottmeier

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. H. Schnyder
Prüfer der Dissertation: 1. apl. Prof. Dr. H. Auernhammer
2. Univ.-Prof. Dr. Dr.h.c.(AE) H. Schön
3. Univ.-Prof. Dr. L. Reiner

Die Dissertation wurde am 06. 03. 1996 bei der
Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Landwirtschaft und Gartenbau
am 08. 05. 1996 angenommen.

Die Arbeit wurde

durch die

Graduiertenförderung der Hanns-Seidel-Stiftung

unterstützt.

Vorwort

Nach Abschluß der vorliegenden Dissertation danke ich allen ganz herzlich, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. H.-L. Wenner † für die Überlassung des Themas und Herrn Prof. Dr. H. Schön für die Übernahme des Koreferates. Weiterhin bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. L. Reiner für die Übernahme des Koreferates und bei Herrn Prof. Dr. H. Schnyder für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr. H. Auernhammer für die Gesamtbetreuung dieser Arbeit nach dem Tod von Herrn Prof. Dr. H.-L. Wenner, für die Übernahme des Koreferates, sowie für die wertvollen Hinweise bei der Abfassung der Arbeit und für die aufgebrachte Geduld. Ebenso danke ich Herrn Dr. Englert und Herrn Dr. Stanzel für Ihre kritische Stellungnahme.

Herrn N. Hemmen und Herrn M. Mittermaier bin ich an dieser Stelle besonderen Dank für die tatkräftige und konstruktive Mithilfe bei der Durchführung dieser Arbeit schuldig. Einschließen möchte ich an dieser Stelle auch das Zeichenbüro der Landtechnik Weihestephan, die Meßtechnikabteilung, die Werkstatt sowie alle Mitarbeiter, die mir helfend zur Seite standen.

Dank gilt ferner der Hanns-Seidel-Stiftung für die Unterstützung meiner Person sowie dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Finanzierung des Projektes. Ein weiterer Dank geht an die Firma Mengele für die Bereitstellung von Versuchsfahrzeugen.

Nicht zuletzt möchte ich den größten Dank an meine Familie, insbesondere an meinen Bruder Nikolaus Rottmeier aussprechen. Ohne deren tatkräftige und praktische Unterstützung wäre der erfolgreiche Abschluß dieser Arbeit sicherlich nicht möglich gewesen.

Inhalt

Seite

1. Einleitung	1
2. Problemstellung	3
3. Stand der Technik und des Wissens	5
3.1 Gewichtsermittlung	6
3.1.1 Stationäre Wiegetechnik	8
3.1.2 Mobile Gewichtsermittlung	11
3.2 Volumenstrommessung	14
3.3 Masseflußermittlung	16
4. Zielsetzung	18
5. Methodenwahl	20
5.1 Dehnungsmeßstreifen	21
5.2 Dehnungsaufnehmer	26
5.3 Bohrlochensoren	28
5.4 Wägezellen	30
5.4.1 DMS - Wägezelle	32
5.4.2 Elastostatische Wägezelle	35
5.5 Dehnungsmessungen und Spannungsanalysen für unter- schiedliche Lastfälle	37
5.5.1 Zug-/Druckspannung	37
5.5.2 Biegespannung	39
5.5.3 Scherspannung	40
5.6 Zusammenfassende Einordnung	42
6. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	44
6.1 Untersuchte Ernte- und Transportfahrzeuge	44
6.2 Sensorapplikationen	48
6.2.1 Sensorapplikation an der Deichsel	54
6.2.2 Sensorapplikation an der Achse	55
6.3 Signalaufbereitung und Datenerfassung	59
6.4 Wiegeablauf	64
6.4.1 Statische Gewichtsermittlung	64
6.4.2 Dynamische Gewichtsermittlung	65
6.5 Fehlerbetrachtung	66
6.6 Datenauswertung	69

II

7. Versuchsergebnisse	71
7.1 Statische Messungen	72
7.1.1 Biegespannung an Achse und Deichsel	72
7.1.2 Scherspannung an der Achse	76
7.1.3 Wägezellen zwischen Achse und Rahmen	82
7.1.4 Wägezelle in der Anhängerkupplung	84
7.1.5 Praktische Wiegeergebnisse	85
7.1.6 Diskussion der statischen Ergebnisse	88
7.2 Dynamische Messungen	89
7.2.1 Verrechnung mit Beschleunigungskräften	93
7.2.1.1 Maximale Beschleunigungswerte	93
7.2.1.2 Beschleunigungskräfte an unterschiedlichen Sensor- applikationsstellen	94
7.2.2 Signalaufbereitung	100
7.2.2.1 Digitale Filterung	100
7.2.2.2 Mittelwertbildung	102
7.2.3 Diskussion der dynamischen Ergebnisse	107
8. Verfahrenstechnische Einordnung der Ergebnisse	110
8.1 Funktionssicherheit	110
8.2 Rechtliche Anforderungen	112
8.3 Aufrüstbarkeit, Nachrüstbarkeit und Kapitalbedarf	113
8.4 Verfahrenstechnische Einordnung	118
8.4.1 Arbeitszeit	119
8.4.2 Verfahrenskosten	120
8.4.3 Teilflächenbezug	122
8.4.4 Datenverarbeitung	122
8.5 Zusammenfassende Betrachtung	123
8.6 Weiterführende Arbeiten	123
9. Zusammenfassung	126
10. Summary	131
11. Literatur	133

III

Abbildungsverzeichnis

Nr.		Seite
1	Gewichtsermittlung in der ldw. Produktion.	7
2	Formen stationärer Gewichtsermittlung.	8
3	Gewichtsermittlung im Schlepper mit Wiegerahmen. . .	12
4	Sensortechniken zur Erfassung der Gewichtskraft. . .	21
5	Meßprinzip beim Dehnungsmeßstreifen (DMS)	22
6	Grundtypen von DMS und deren typische Anwendung . .	25
7	Bauarten von Dehnungsaufnehmern.	27
8	Bohrlochsensor GOZINTA in einem Hubarm.	28
9	Wägezelle als elektromechanischer Wandler (nach Schuster [61]).	30
10	Ausführungsformen von Wägezellen.	33
11	Elastostatische Wägezelle.	35
12	Kraftmessung am Zug-/Druckstab.	38
13	Spannungsverlauf und Dehnungen am Biegebalken. . . .	39
14	Die Richtungen der Hauptdehnungen am Scherstab mit über- lagerten Biege- und Scherspannungen.	41
15	Einordnung ldw. Transport - und Erntefahrzeuge. . .	44
16	Verteilung der Gewichtskräfte in ldw. Fahrzeugen. .	46
17	Vereinfachte Darstellung eines aufgesattelten Fahrzeuges als Kragarmträger auf zwei Stützen.	49
18	Fahrzeugachse als Einfeldträger mit 2 Einzellasten.	52
19	Sensoreinsatz zur Gewichtsermittlung an der Fahrzeug- deichsel.	54
20	Sensoreinsatz zur Gewichtsermittlung an der Fahrzeug- achse.	56
21	DMS-Applikation an der Rundballenpresse.	58
22	Schematischer Aufbau einer Meßkette	60
23	Eingesetzte Meßtechnik zur Gewichtsermittlung in ldw. Fahrzeugen.	61
24	Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung mit WLA 1000 (Biegespannung) auf der Achse.	72
25	Gewichtsermittlung am Einachsladewagen mit Microcell auf Achse und Deichsel.	73
26	Absolute Abweichung bei 2 Durchgängen am Ladewagen mit Microcell auf Achse (Biegespannung) und Deichsel. .	73
27	Gewichtsermittlung mit DMS (Biegespannung) an der Deich- sel (Mengele LW 435).	75
28	Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung am Mengele LW 435 mit DMS auf Achsen (Scherspannung) und Deichsel.	77

IV

29	Absoluter Fehler am LW 435 mit DMS auf der 1. Achse.	78
30	Absoluter Fehler am LW 435 mit DMS auf der 2. Achse.	78
31	Absoluter Fehler am Pöttinger EP II mit DMS auf der Achse und der Deichsel (1 Wiegezyklus).	79
32	Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse mit DMS auf Achse und Deichsel.	80
33	Relativer Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse mit DMS auf Achse und Deichsel.	81
34	Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung im Kipper mit Druckkraftwägezellen.	83
35	Relativer Fehler bei der Gewichtsermittlung im Kipper mit Druckkraftwägezellen.	83
36	Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Anhängerkupplung mit Wägezelle.	84
37	Relativer Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Anhängerkupplung mit Wägezelle.	85
38	Praktische Wiegung von Heurundballen mit der Wiegeeinrichtung in der Rundballenpresse.	86
39	Praktische Wiegung von Strohundballen mit der Wiegeeinrichtung in der Rundballenpresse.	87
40	Schwingungersatzsystem für ein landwirtschaftliches Fahrzeug.	90
41	Beschleunigungskräfte an der Achse der Rundballenpresse beim Pressen von Grassilage.	94
42	Beschleunigungskräfte an unterschiedlichen Applikationsstellen bei der Rundballenpresse.	95
43	Gleitender Mittelwert der Beschleunigungskräfte an der Achse der Rundballenpresse.	96
44	Beschleunigungskräfte während der Fahrt beim Einachsladewagen mit Sensor auf der Achse.	97
45	Beschleunigungskräfte während der Fahrt bei der Rundballenpresse mit Sensor in der Achsmittle.	97
46	Gleichzeitig erfaßtes Gewichts- und Beschleunigungssignal am Ladewagen (Achse).	98
47	Dynamisches Gewichts- und Beschleunigungssignal an der Achse der Rundballenpresse.	99
48	FFT vom Gesamtgewichtssignal und vom Beschleunigungssignal an der Achse der Rundballenpresse.	101
49	Dynamische Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse vor und nach einer Tiefpaßfilterung.	102
50	Gleitender Mittelwert über 60 Werte bei der dynamischen Gewichtsermittlung am Einachsladewagen.	105
51	Gleitender Mittelwert über 60 Werte bei der dynamischen Gewichtsermittlung an der Rundballenpresse.	105
52	Dynamische Gewichtsermittlung beim Laden mit dem Einachsladewagen	106

53	Dynamische Gewichtsermittlung beim Laden mit dem Ein- achslerwagen	107
54	Vorschläge für industriell anzubringende Schwächungen an Achse und Deichsel für die Applikation von DMS. . .	114

VI

Tabellenverzeichnis

Nr.		Seite
1	Anbauflächen und Erträge von Futterpflanzen in Deutschland und Bayern (1991).	1
2	Einsatzbereiche von Wiegesystemen im Schlepper. . .	14
3	Vorteile und Nachteile der DMS - Applikation	24
4	Übersicht der wichtigsten Meßprinzipien bei Wägezellen	31
5	Vor- und Nachteile von DMS-Wägezellen.	34
6	Vor- und Nachteile von elastostatischen Wägezellen.	37
7	Einordnung der unterschiedlichen Sensortechniken. .	43
8	Eingesetzte Versuchsfahrzeuge.	47
9	Eingesetzte Sensoren zur Gewichtsermittlung.	59
10	Übersicht über Art und Verwendung der Meßtechnik. .	63
11	Relativer Bezug des Wiegefehlers zu Maschinengewichten und Erntemengen.	68
12	Schema der Datenauswertung.	70
13	Gewichtsermittlung über Biegespannung an der Achse.	74
14	Gewichtsermittlung über Biegespannung an der Deichsel.	76
15	Meßergebnisse bei der Gewichtsermittlung mit DMS über Scherspannung an der Achse.	82
16	Fehlerklassen bei prakt. Wiegung von Strohrundballen.	87
17	Kapitalbedarf der unterschiedlichen Sensorsysteme. .	116
18	Kalkulierter Verkaufspreis für ein integriertes Wägesystem in einem Tandemachs-Ladewagen.	117
19	Kalkulierter Verkaufspreis für ein integriertes Wägesystem in einer Rundballenpresse.	117
20	Arbeitszeitbedarf bei der Ertragsermittlung mit stationären Waagen [5].	120
21	Kostenvergleich bei unterschiedlichen Wiegesystemen.	121

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

a	Beschleunigung
c	Federkonstante
dl	Längenänderung
F	Kraft
f	Frequenz
f ₀	Eigenfrequenz
G	Gewichtskraft
g	Erdbeschleunigung 9,81 m/s ²
L	Länge
m	Masse
n	Drehzahl
t	Zeit
V	Volumen
ε	Dehnung
π	3,14159265
ρ	Dichte

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

DMS	Dehnungsmeßstreifen
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ELS	Elastostatisch
FFT	Fast Fourier Transformation
GPS	Global Positioning System
g	Gramm
kg	Kilogramm
LBS	Landwirtschaftliches Bussystem
LW	Ladewagen
PC	Personal Computer
VB	Vertrauensbereich
Wz	Wägezelle

1. Einleitung

In Deutschland betrug 1991 der Anteil der Hauptfutterflächen 63 % der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche. Etwa 50 % des Ackerlandes wurden für den Futterbau genutzt. Dabei entfielen etwa 47 % auf Getreide und 47 % auf Grün- und Rauhfutter. Der Rest verteilte sich auf Hackfrüchte und Sonstiges.

Aus diesen Zahlen [66] wird die Bedeutung des Futterbaus für die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland ersichtlich. Dies spiegelt sich auch in der Aufteilung der Betriebe nach Betriebsformen wieder: 1989 (früheres Bundesgebiet) entfielen von den insgesamt 607 000 ldw. Betrieben 328 000 auf Futterbau (ca. 54%) und 28 000 auf Gemischtbetriebe (ca. 4%) im Gegensatz zu 175 000 Marktfrucht- (ca. 29%), 29 000 Veredelungs- (ca. 4%) und 55 000 Dauerkulturbetrieben (ca. 9%) [66].

Abweichend davon hat in Bayern bedingt durch geographische und klimatische, aber auch durch strukturelle Gegebenheiten, der Futterbau eine noch größere Bedeutung [8] als im übrigen Bundesgebiet (Tab. 1).

Tabelle 1: Anbauflächen und Erträge von Futterpflanzen in Deutschland und Bayern (1991).

Futterpflanze	Anbaufläche		
	BRD (ha)	Bayern (ha)	rel. Anteil an BRD
Klee	269 000	90 900	33,8
Luzerne	110 000	9 100	8,3
Wiesen	2 657 000	1 056 000	39,7
Weiden und Mähweiden	2 672 000	180 600	6,7
Grasanbau	239 000	11 000	4,6
Silomais	1 309 000	336 000	25,7
ldw. genutzte Fläche	17 137 000	3 399 800	19,8

So entfallen von den Anbauflächen der alten und neuen Bundesländer bei Klee und Wiesen 34 % bzw. 40 % auf Bayern. Zusätzlich beträgt in Bayern der Silomaisanbau fast 26 % der gesamten Silomaisanbaufläche Deutschlands.

2. Problemstellung

Ungeachtet dieser speziellen Situation in Bayern kann eine optimale Betriebsführung nur mit aktuellen und zuverlässigen Daten realisiert werden. Im Bereich der Betriebsdatenerfassung herrscht jedoch in den landwirtschaftlichen Betrieben trotz des stark gestiegenen Einsatzes der elektronischen Datenerfassung ein hohes Defizit an wirklich ermittelten Daten [3]. Besonders betroffen ist der Bereich der Außenwirtschaft. Die Marktfruchtbetriebe können zumindest über den Verkauf ihrer Produkte und den Zukauf von Produktionsmitteln eine grobe Zusammenstellung der Güterströme vornehmen. Dagegen besteht in Futterbaubetrieben nur selten die Möglichkeit, zum einen die Ernteerträge und zum anderen die eingesetzten Produktionsmittel mengenmäßig exakt zu ermitteln.

Ausgehend von der sich zur Zeit stark im Wandel befindlichen Struktur der landwirtschaftlichen Betriebe und deren Betriebsflächen wird der einzelne Landwirt zukünftig aus Gründen der Wirtschaftlichkeit gezwungen sein, diese Güterströme genauer zu erfassen. Dies wird durch eine ökonomische Untersuchung von ISERMEYER [29] unterstrichen, der anhand von Erhebungsdaten aus Niedersachsen "Überdüngungskosten" von 286 DM/ha in Futterbaubetrieben feststellte. Sie liegen in diesem Bundesland dreimal so hoch wie bei vergleichbaren Marktfruchtbetrieben.

Doch nicht nur die ökonomischen Belange der Landwirte sind zu beachten. Im gleichen Maße werden zukünftig die ökologischen Anforderungen des Umweltschutzes eine exakte Überwachung der Ausbringungs- und Erntemengen erfordern. Bereits in der Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung von 1985 [15] wurde die generelle Anpassung der Düngemaßnahmen an den aktuellen Nährstoffbedarf der Pflanzenkulturen und dem pflanzenverfügbaren Nährstoffvorrat im Boden gefordert. Ebenso sieht der Entwurf der Düngemittel-Anwendungsverordnung die Verpflichtung der ldw. Betriebe vor, mit Ausnahme von Kleinerzeugern, eine schlagbezogene Aufzeichnung der Nährstoffzufuhr und der Nährstoffentzüge durchzuführen. Diese sind in bestimmten Fällen bis zu 6 Jahre, im allgemeinen bis zum Eingang der nächsten Untersuchungsergebnisse aufzubewahren.

Als Grundlage für eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Landwirtschaft muß die Ertragsermittlung eine Kenngröße für die Anpassung der Düngung liefern.

Allerdings fehlen dazu in den meisten Betrieben die Voraussetzungen. Nur eine geringe Anzahl von Landwirten verfügt über stationäre Wiegesysteme, in der Regel Fuhrwerkswaagen, um die Güterströme auf dem Betrieb zu erfassen. Neue Ansätze aus der Wirtschaft und der Industrie finden dagegen nur zögernd Eingang in die Betriebe. Hier sind vor allem verschiedene Lösungsansätze und auch schon praxisreife Techniken zur Erfassung der mit Schleppern transportierten und verteilten Mengen durch den Einsatz von Wiegesystemen im Schlepperheck [1, 2, 37, 38, 39, 64] zu nennen. Nachdem bereits seit Jahren an der Feststellung der Erntemenge bei Getreide [7; 21; 27; 75] gearbeitet wird, bieten mittlerweile zwei Mähdrescherhersteller für ihre großen Erntemaschinen Ertragsermittlungseinheiten an [3]. Im Gegensatz dazu ist die Ertragsermittlung in Futtererntemaschinen und landwirtschaftlichen Transportfahrzeugen, die einen Großteil des innerbetrieblichen Gütertransportes übernehmen, noch weitgehend ungelöst [4, 16, 21]. Ein erster Versuchsansatz von VANSICHEN und DE BAERDEMAKER [72] für die Ertragsermittlung am Maishäcksler über die Erfassung des Antriebsdrehmomentes ist noch sehr ungenau. Zudem erfordert er eine ständige Kalibrierung des Systems über Referenzwiegungen. Dies führt zu der Überlegung, daß die Lösung dieser Aufgabe durch den Einsatz von verbesserten und angepaßten Techniken zur Gewichtsermittlung zu erreichen sein müßte.

3. Stand der Technik und des Wissens

Die nachfolgenden Grundlagen beziehen sich auf die derzeitigen und prinzipiellen Möglichkeiten zur Gewichtsermittlung bei landwirtschaftlichen Gütern. Diese lassen sich physikalisch gesehen in drei voneinander unterschiedliche Möglichkeiten zur Quantifizierung von Güterströmen einordnen:

- Gewichtsermittlung,
- Volumenmessung und
- radiometrische Massebestimmung.

Alle diese Meßprinzipien, die bereits in einigen ldw. Maschinen zum Einsatz kommen, stehen in einem engen physikalischen Zusammenhang:

$$(1) \quad m = V * \rho$$

$$(2) \quad F = m * g$$

m Masse des Körpers,
V Volumen,
 ρ Dichte,
F Kraft (hier Gewichtskraft),
g Erdbeschleunigung.

Waagen, bzw. Wiegeeinrichtungen erfassen nach KOCHSIEK [34] den sogenannten "Wägewert" als einen Näherungswert der Masse, da diese mit einer Waage nicht direkt ermittelt werden kann. In diesem Falle wird die sogenannte "träge Masse" bestimmt. Diese ist im physikalischen Sinne die Gewichtskraft, die einen Körper mit einer bestimmten Masse an einem bestimmten Ort auf seine Unterlage drückt.

Die direkte Massebestimmung ist durch radiometrische Massebestimmungsverfahren möglich. Diese nutzen die Eigenschaft der Materie, radioaktive Strahlen oder Röntgenstrahlen um so stärker in ihrer Intensität zu schwächen, je größere Massebelegungen (Masse pro Flächeneinheit) sie durchdringen müssen [19].

Schließlich bietet die Volumenmessung eine indirekte Möglichkeit, die Masse bzw. das Gewicht zu ermitteln [34; 37; 58].

3.1 Gewichtsermittlung (konventionelle Wiegesysteme)

Die meisten Möglichkeiten der Gewichtsermittlung bietet nach wie vor die konventionelle Wägetechnik. Auch in diesem Bereich hat sich im Laufe der letzten Jahre ein starker Wandel vollzogen. Die immer weitergehenden Rationalisierungsmaßnahmen verlangen schnellere Wägevorgänge. Dies ist vielfach nur durch den Einsatz elektrischer oder elektronischer Mittel zu erreichen. Kennzeichnend ist neben der Automatisierung des Wägevorgangs ebenso der Wunsch nach selbstständiger Registrierung und Fernübertragung der Wägeregebnisse und deren Weiterverarbeitung in Datenverarbeitungssystemen [61].

Mit dieser fortschreitenden Automatisierung technologischer Prozesse verlor jedoch die Waage immer mehr ihre Bedeutung als Einzelmeßgerät, vielmehr wurde sie dafür ein wichtiges Glied in Regel- und Steuerungsabläufen, das mit seinen Informationen Prozesse steuert und regelt und wichtige Daten zur Bilanzierung liefert [11, 12, 36, 61].

Rechtlich gesehen muß zwischen eichfähigen und nichteichfähigen Systemen unterschieden werden [34]. Zum Verwiegen für den Verkauf von Handelsgütern (Dünger, Getreide) ist die Eichfähigkeit der Klasse III nötig, während zur Masseermittlung von groben Schüttgütern (Kies) die Eichklasse IV ausreicht. Die Eichfähigkeit der Klasse III und IV setzt eine baumustergeprüfte Wägeeinrichtung mit speziellen Anforderungen voraus. Dadurch werden die Anschaffungskosten einer Waage je nach Ausführungsform erheblich verteuert. Nach Auskunft der Physikalisch Technischen Bundesanstalt in Braunschweig muß für die Baumusterprüfung eines Wägesystems (Elektronik - Wägezelle - Aufbau) mit ca. 40.000 - 50.000 DM gerechnet werden. Zudem muß die Eichung alle 3 Jahre von der zuständigen Eichbehörde wiederholt werden. Dies ist mit weiteren Kosten von 1.000 bis 1.500 DM pro Eichung verbunden. Durch diesen erheblichen finanziellen Mehraufwand und den in den meisten Fällen relativ geringen Nutzen (für die rechtliche Anerkennung eines geeichten Gewichtswertes muß die Wiegung auf einer geeichten Waage von einer amtlich zugelassenen Wägeperson durchgeführt werden) kann im landwirtschaftlichen Einsatz meist auf eine geeichte Waage

3.1.1 Stationäre Wiegetechnik

Stationäre Wiegetechniken wurden bisher bereits in verschiedenen Formen in der landwirtschaftlichen Produktion eingesetzt. Im Bereich der Innenwirtschaft werden stationäre Wiegesysteme vor allem zur Steuerung und zur Kontrolle von Futtermischanlagen verwendet [14, 58]. In der Außenwirtschaft dienen vornehmlich Fuhrwerkswaagen [40, 50, 63, 67] der Erfassung von Erträgen und Aufwandsmengen und zur Kontrolle der Güterströme vom und zum ldw. Betrieb. In der Abbildung 2 sind mit den Achslast- und Radlastwaagen zwei weitere Möglichkeiten zur stationären Ertragsermittlung und Gewichtserfassung aufgezeigt.

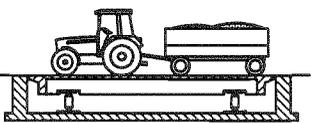
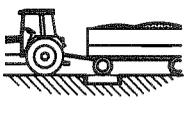
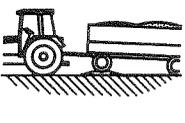
Form			
	Fuhrwerkswaage	Achslastwaage	Radlastwaage
Einsatz	Stationär	stationär, aber versetzbar	versetzbar
Vorteil	ermittelt Gesamtgewicht eichfähig	begrenzt mobil geringe Beeinträchtigung des Betriebsablaufes	mobil leicht zu transportieren
Nachteil	aufwendig, teuer stört den Betriebsablauf teilschlagbezogene Ertragsermittlung schwierig	bedingt eichfähig geringere Genauigkeit teilschlagbezogene Ertragsermittlung schwierig	nicht eichfähig geringere Genauigkeit teilschlagbezogene Ertragsermittlung schwierig

Abbildung 2: Formen stationärer Gewichtsermittlung.

Die Brückenwaage (volkstümlich Fuhrwerkswaage genannt) übernimmt dabei nach wie vor die zentrale Stellung. Während ältere Waagen ausschließlich mechanisch aufgebaut waren, wurden diese inzwischen überwiegend durch elektromechanische Systeme ersetzt. Die Meßsignale der eingesetzten Kraftaufnehmer (je nach Größe der Waage 4 Stück oder mehr) werden von einer Auswertelektronik aufbereitet und angezeigt. Kraftaufnehmer sind Sensoren, die eine auf sie wirkende Gewichtskraft in ein elektrisches Signal

umformen. Als Mischform zwischen den mechanischen und den elektromechanischen Waagen gibt es die sogenannten Hybridwaagen. Diese besitzen den herkömmlichen Aufbau einer mechanischen Waage. Die aufgebrachte Last wird über Gestänge, Schneiden, Pfannen usw. nicht mechanisch zur Anzeige gebracht, sondern auf eine elektronische Wägezelle übertragen, dessen Ausgangssignal wie bei elektromechanischen Waagen weiterverarbeitet werden kann. Damit ergibt sich die Möglichkeit, zum einen den hohen Wartungsaufwand mechanischer Waagen zu verringern und zum anderen die gewonnenen Daten auf elektronischem Wege weiterzuverarbeiten.

Der wohl größte Nachteil der Brückenwaagen ist der hohe bauliche Aufwand und der damit verbundene Kapitalbedarf von 30.000 - 60.000 DM [50]. Dieser läßt sich durch den Einsatz von gebrauchten mechanischen Fuhrwerkswaagen oder durch den Kauf von Waagenbausätzen und Eigenbau etwas verringern. Beide Lösungen erfordern jedoch einen hohen Arbeitsaufwand und sind meistens mit einer geringeren Genauigkeit der Waage verbunden.

Als weiterer Nachteil ist bei Fahrzeugwaagen das hohe Eigengewicht der Waagenbrücke zu nennen. Zusammen mit der zu wägenden Nutzlast muß die Bruttolast kleiner als die Nennlast der Wägezellen sein. Hinzu kommen dynamische Beanspruchungen. Die Grenzlast der Wägezellen darf keinesfalls überschritten werden. Demzufolge ist die Wägezellenausnutzung (Nutzlast/Nennlast) bei Fahrzeugwaagen relativ klein. Rein meßtechnisch kann nur ein Bereich von 20 - 50 % der Wägezellen-Nennlast ausgenützt werden, dies hat eine geringere Auflösung der Gewichtsanzeige von 10 oder 20 kg zur Folge.

Um diese Nachteile zu einem gewissen Teil zu kompensieren, bieten die Waagenhersteller seit einiger Zeit "nicht eichfähige" oder nur für Klasse IV (Grobwaagen) eichfähige [34] Achslastwaagen an. Diese Waagen mit einer Plattformgröße von 2,8 m bis 3,5 m * 0,7 m bis 1,0 m besitzen durch den Einsatz von 4 - 6 elektronischen Wägezellen eine Bauhöhe von lediglich 20 - 30 cm. Durch das geringe Gewicht von 300 - 500 kg sind sie auch versetzbar. Mittlerweile bieten einige Hersteller ihre Achslastwaagen auch für die Wägung bei laufender Überfahrt mit 3 - 6 km/h an. Damit

entfällt das zeitaufwendige Anhalten des Fahrzeugs zur Verwiegung jeder einzelnen Achse auf der Brücke, die zudem bei Transportzügen schlecht eingesehen werden kann.

Bei Preisen von 12.000 bis 20.000 DM stellen Achslastwaagen durchaus eine interessante Alternative für die Erfassung von innerbetrieblichen Güterströmen dar, da sie durch die Kopplung mit dem Betriebsrechner einen weitgehend papierlosen Datentransfer ermöglichen. Allerdings entsteht durch die Summierung der einzelnen Achslasten zur Gesamtlast des Fahrzeuges ein nicht zu unterschätzender Fehler, der in der Regel größer ist als der Fehler bei der Gesamtwiegung eines Fahrzeuges. Für innerbetriebliche Zwecke ist dieser allerdings von untergeordneter Bedeutung.

Noch handlicher und universeller einsetzbar sind Radlastwaagen (sog. Polizeiswaagen) mit einer Plattformgröße von ca. 50 cm * 50 cm bei einer Höhe von 10 - 15 cm und einem Gewicht von 40 - 80 kg. Neben der Fahrzeugwiegung mit 2 oder 4 Radlastwaagen bietet sich hier auch die Möglichkeit des stationären Einbaus unter Futter-silos oder Mischanlagen. Allerdings ist beim Umgang mit Radlastwaagen zur Erzielung ausreichender Genauigkeiten eine Mindestsorgfalt unverzichtbar. Zum einen ist ein fester Untergrund (Teerstraße oder Betonboden) zur Aufstellung nötig, zum anderen sind die Plattformen vor Überlast zu schützen. Beide Anforderungen sind im landwirtschaftlichen Robustbetrieb nicht ohne weiteres einzuhalten. Der relativ hohe Preis von ca. 5.000 DM pro Einzelplattform ist einer der Gründe, daß diese Wiegesysteme bisher noch keinen Einsatz in der ldw. Praxis gefunden haben [10, 65].

Alle aufgezeigten Wiegetechniken haben folgendes gemeinsam:

- Sie müssen zur Gewichtsermittlung angefahren werden. Es sind also Störungen des Arbeitsablaufes und eine Verringerung der Verfahrensleistung in Kauf zu nehmen.
- Sie erlauben keinen Bezug zur kleinen Teilfläche (Flächenstücke unter 0,5 ha, die einen großen Schlag in kleinere Einheiten unterteilen. Teilflächen erlauben eine spezifische Anpassung von Düngung und Pflanzenschutz an den Bedarf des Bestandes).

- Sie erlauben keine direkte Einbeziehung in eine laufende Maschinenüberwachung oder -steuerung.

Dies hat zur Folge, daß für eine teilschlagbezogene Betrachtungsweise stationäre Systeme nur bedingt geeignet wären. Als Lösung ergibt sich die **Integration der Gewichtsermittlung in der mobilen Technik**. Die stationären Systeme könnten dabei die summarische Gewichtsermittlung zur Überprüfung und zur Kalibrierung der mobilen Systeme übernehmen.

3.1.2 Mobile Gewichtsermittlung

In der industriellen Wägetechnik besteht derzeit ein starker Trend zur Integration von Wiegetechniken in verschiedene Fahrzeuge. Als Beispiele sind Gabelstapler, Radlader und Müllfahrzeuge (noch weitgehend in Erprobung) zu nennen. Gründe hierfür sind ebenfalls die exaktere Überwachung der Güterströme, die bessere Ausnutzung von Transportkapazitäten, die Erhöhung der Verfahrensleistung und nicht zuletzt eine direkte Kostenzuweisung an kleinere Teilmengen.

Auch in der landwirtschaftlichen Produktion haben mittlerweile einige mobile Wiegesysteme Eingang gefunden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei zum einen auf dem Schlepper als Träger von Anbaugeräten und zum anderen auf den mobilen Futtermischwagen zur exakten Überprüfung der Futterrationsanteile. Auch erste mobile Wiegesysteme für aufgebaute und gezogene Düngerstreuer sind verfügbar.

Die Futtermischwagen [62] als Vorreiter der mobilen Wiegetechnik wurden lange Zeit mit dem Wiegesystem der amerikanischen Firma "Weightronic" ausgestattet. Dieses besteht aus 3 gleichartigen Wägezellen in Form von Wiegestäben und einer Auswerteeinheit. Die bei Futtermischwagen üblichen Achsstummeln werden gegen zwei Wiegestäbe ausgetauscht. Der dritte Wiegestab befindet sich an der Deichsel als feste Verbindung zwischen Rahmen und Zugöse. Neuere Systeme verlassen dieses Prinzip. Die Wiegestäbe oder Meßbolzen stellen nunmehr die Verbindung zwischen dem Rahmen und dem Mischbehälter dar. Dies hat zunächst den Vorteil, daß

geringere Nebenkräfte auf die Sensoren einwirken und damit das Meßergebnis genauer wird. Der Hauptvorteil liegt allerdings darin, daß die Wiegezellen jederzeit gegen einfache Gewindespindeln und umgekehrt ausgetauscht werden können. Damit kann das Wiegesystem ohne bauliche oder konstruktive Änderungen zu einem späteren Zeitpunkt nachgerüstet werden. Zu bemerken sind jedoch die relativ hohen Preise in Höhe von 7.000 bis 15.000 DM für ein Fahrzeug [28]. Im Verhältnis zum Gesamtpreis von Futtermisch- und Verteilwagen in der Größenordnung von 50.000 - 100.000 DM werden diese 10 - 15 % von den Landwirten zum Teil akzeptiert. In diesem Fall sind besonders die produktionstechnischen Vorteile (zum Beispiel Leistungssteigerung) entscheidend für die Kaufentscheidung [28, 46].

Ein technisch neues Konzept verfolgen die sogenannten Wiegerahmen (Abb. 3) für die Gewichtsermittlung am Schlepperheck. Diese Systeme werden als autarke Wiegesysteme betrachtet, da sie unabhängig von einem bestimmten Schlepper oder Gerät eingesetzt werden können. Die Wiegerahmen werden zwischen Schlepper und Anbaugerät in die Dreipunktanhängung gekoppelt. Die einzige Anforderung für eine korrekte Funktion ist die Einhaltung einer annähernd lotrechten Stellung beim Wiegevorgang.

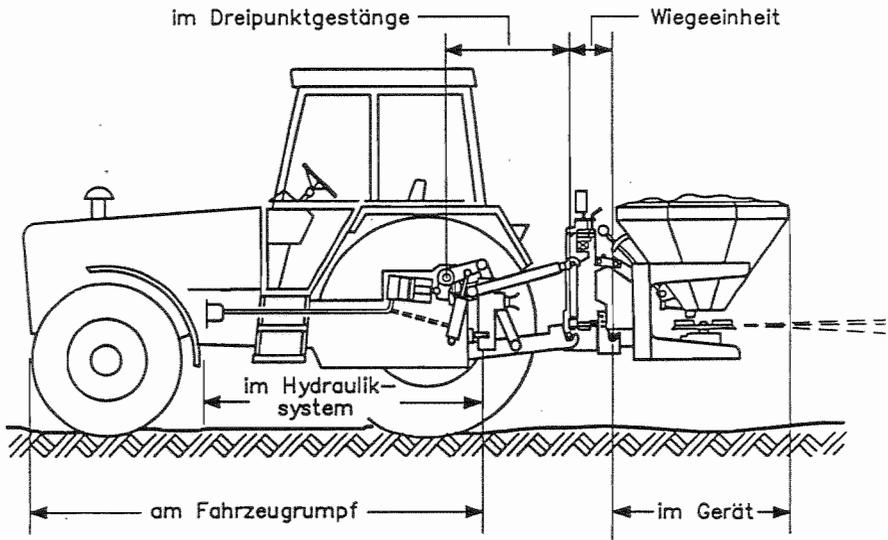


Abbildung 3: Gewichtsermittlung im Schlepper mit Wiegerahmen.

Der "LANDSBERG - Wiegerahmen" ist ein an Blattfedern geführtes Parallelogramm, das sich auf eine Wägezelle abstützt. Dagegen ist der "MOBA - Wiegerahmen" als starrer Doppelrahmen ausgebildet, dessen Rahmenhälften mit 3 Wiegestäben verbunden sind. Beide Systeme besitzen eine eigene Elektronik mit Anzeigen und z. T. eine autarke Stromversorgung. Hinsichtlich der Genauigkeit stellen die Wiegerahmen sehr leistungsfähige Systeme zur Gewichtsermittlung an Traktoren dar. Zusätzlich zu dem hohen Preis von 5.000 - 7.000 DM ist die Verlagerung der Anbaugeräte um 20 bis 40 cm nach hinten ein gravierender Nachteil. Diese Punkte dürften ausschlaggebend für die geringe Akzeptanz dieser Systeme bei den Landwirten sein. Weiterhin gibt es in der Praxis beim Anbau oftmals Probleme mit der Gestängeführung bei den Anbaugeräten [54, 55].

Im Gegensatz dazu sind die im Schlepper integrierten Systeme auf der Basis der Hydraulikdruckmessung relativ ungenau (bestenfalls $\pm 2\%$). Hierbei wird der Druck im Hubzylinder des Heckkrafthebers mit Hilfe eines elektronischen Drucksensors erfaßt und in ein lastproportionales Signal umgerechnet [39, 45]. Von großem Vorteil

wären die niedrigen Kosten dieses Systems und die technisch einfache Nachrüstbarkeit für ältere Schlepper. Dem steht allerdings die bereits erwähnte geringe Genauigkeit [1, 2] gegenüber. Diese ist größtenteils systembedingt. Andererseits sind die im Schlepperheckkraftheber integrierten Systeme in ihrer Funktion stark von der Geometrie des Dreipunktgestänges beim Wiegevorgang abhängig [55].

Ein bereits entwickeltes System mit einer in der Hubstrebe [55] integrierten Sensorapplikation wird zeigen, ob sich diese Wiegesysteme zum Beispiel als Zubehör beim Schlepperneukauf etablieren können.

Die Haupteinsatzbereiche dieser Schlepperwiegesysteme liegen in der Innenwirtschaft bei der Verwiegung von Silageblöcken und Rundballen und damit bei einer exakteren Ermittlung der Futterration. Im Bereich der Außenwirtschaft sind diese Wiegesysteme eine unabdingbare Voraussetzung für eine zukünftig verbesserte und optimierte Düngerausbringung [3, 4]. Diese Systeme eignen sich mehr oder weniger gut für die unterschiedlichen Aufgaben (Tab. 2). Dies ist auch der Anlaß für einige Hersteller von Düngerstreuern, zumindest größere, fahrbare Düngerstreuer mit Wiegetechnik auszustatten. Ähnlich wie bei modernen Futtermischwagen werden hier der Fahrzeugrahmen und der Rahmen des aufgebauten Düngerstreuers mit Wägezellen verbunden. Dies ist in diesem Fall aufgrund der Neuentwicklung dieser Düngerstreuer mit der grundlegenden Einbeziehung der Wiegetechnik problemlos möglich.

Bei all diesen mobilen Systemen, die sich in oder an den verschiedenen Fahrzeugen befinden, ist bis zum jetzigen Zeitpunkt mit Ausnahme eines Wiegesystems am Anbaudüngerstreuer nur die statische Gewichtsermittlung möglich. Dies bedeutet, daß die Wiegung nur im Stillstand des Fahrzeuges, zum Beispiel nach der Beladung oder am Schlagende, erfolgen kann. Dieses absätziges Verfahren dient vor allem der Verfahrensüberprüfung hinsichtlich der vorgenommenen Stellgrößen und der summarischen Erfassung von eingesetzten Betriebsmitteln.

Tabelle 2: Einsatzbereiche von Wiegesystemen im Schlepper.

Innenwirtschaft		Außenwirtschaft	
Einsatz	Eignung	Einsatz	Eignung
Wiegen von Silageblöcken	gut	Wiegung der Düngerausbringung	gut
Wiegen von Rund- oder Quaderballen	gut	Ertragsermittlung bei Großballen	mittel
Tierwiegung	mittel	Füllstandswiegung bei Anbauspritzgeräten	mittel
allgemeine Wiegung mit Kleinplattform	gut		

3.2 Volumenstrommessung

Durch die Messung des Volumens und der Dichte beziehungsweise des spezifischen Gewichtes läßt sich indirekt die Masse eines Stoffes ermitteln. Bekannt und verbreitet sind diese unterschiedlichen Verfahren der Volumendurchflußmessung vor allem bei gasförmigen oder flüssigen Materialien [34]. Das Hauptproblem dieser Meßverfahren ist die notwendige Homogenität des zu messenden Stoffes.

Während die Mehrzahl dieser Durchflußmesser nur für flüssige oder gasförmige Medien geeignet sind (Schwebekörper- und Stauscheibendurchflußmesser, Ultraschalldurchflußmesser, Wirbeldurchflußmesser, Dralldurchflußmesser, induktive Durchflußmesser), eignen sich Volumenzähler auch für bestimmte Feststoffe. Bei diesem Meßprinzip wird der durch einen Rohrquerschnitt fließende Materialstrom mit Hilfe von Schaufelrädern, Turbinen oder sonstigen rotierenden Meßkammern in kleine Teilvolumina aufgeteilt und durch die Ermittlung einer proportionalen Rotordrehzahl erfaßt. Auf diesem Grundprinzip basiert auch eines von mehreren zur Zeit verfügbaren Ertragsermittlungssystemen in Mähdreschern [3]. Hier wird der Volumenstrom des Getreides nach dem Körner-elevator über ein Zellenrad ermittelt, dessen Anzahl von Umdrehungen proportional zur durchfließenden Getreidemenge ist.

Trotz des relativ homogenen Meßgutes Getreide werden hier die Hauptprobleme der volumetrischen Masseermittlung sichtbar:

- Die Genauigkeit des Meßsystems ist direkt abhängig von der mehr oder weniger stark schwankenden Dichte des Meßgutes. Beim Getreide bedeutet dies, daß bei jedem Schlag- oder Sortenwechsel durch das sich ändernde Hektolitergewicht und die sich ändernde Gutsfeuchte eine Neukalibrierung nötig wird.
- Der technisch-bauliche Aufwand ist relativ hoch und verursacht besonders bei der Messung von Feststoffen relativ hohe Kosten.
- Bei wechselnden Gütern (Mais, Raps) ist jedesmal eine Neukalibrierung des Meßsystems notwendig.
- Bei feuchten Gütern (Körnermais) kann die Genauigkeit durch mechanische Probleme (Anlagerungen und Verschmutzung der Meßeinheit) erheblich verschlechtert werden.
- Die Auflösung des Systems ist abhängig von der Größe des Zellenrades. Dies bewirkt bei unterschiedlichen Erntemengen (z. B. Raps mit 25 dt/ha im Gegensatz zu Körnermais mit 120 dt/ha) eine entsprechend bessere oder schlechtere Auflösung.
- Durch den Eingriff in den Gutstrom sind mechanische Probleme bei der Materialförderung nicht zu vermeiden.

Für die Masseermittlung von Grüngut scheidet dieses Verfahren von vorneherein durch die Inhomogenität des Gutes aus. Außerdem wäre der bauliche Aufwand zur Portionierung (speziell am Ladewagen) unverhältnismäßig hoch.

3.3 Masseflußermittlung

Radiometrische Massebestimmungsverfahren, die im Sinne von DIN 8120 nicht streng unter die Wägeverfahren zu rechnen sind, arbeiten mit der Eigenschaft der Materie, radioaktive oder Röntgenstrahlen um so stärker in ihrer Intensität zu schwächen, desto größere Massebelegungen (Masse pro Flächeneinheit) sie durchdringen müssen [19, 34]. Das Produkt aus der gemessenen Schüttgutbeladung multipliziert mit der Fördergeschwindigkeit ergibt den Massestrom. Daraus läßt sich durch Integration die geförderte Menge berechnen. Der Hauptvorteil des radiometrischen Meßsystems liegt in der berührungslosen Messung von Feststoffen. Dies führte zu einem verbreiteten Einsatz bei industriellen Förderbandanlagen, mit deren Hilfe vor allem grobe Schüttgüter

erfaßt werden. Auch im Mähdrescher wird dieses Meßprinzip bereits erfolgreich zur lokalen Ertragsermittlung eingesetzt [3].

Es bestehen allerdings einige gravierende Nachteile, die den Einsatz bei anderen ldw. Gütern außer Getreide erheblich erschweren:

- Wegen der nichtlinearen Abhängigkeit, nach der die einzelnen Strahlungsanteile beim Durchdringen des Wägegutes entsprechend der dabei durchstrahlten Flächenmasse geschwächt werden, ist die vom Empfänger erfaßte Reststrahlung in starkem Maße abhängig von der räumlichen Dichteverteilung des Wägegutes und damit dessen Geometrie und der Dichte seiner einzelnen Bestandteile. Während das Meßprofil beim Mähdrescher aufgrund der baulichen Voraussetzungen am Körnerelevator relativ konstant ist und das Wägegut Getreide sowohl in der Dichte als auch hinsichtlich Feuchtegehalt weitgehend homogen ist, schwanken diese Parameter beim Grüngut erheblich.
- Dem radiometrischen Meßprinzip liegt die Absorption von Gammastrahlen beim Durchgang durch die Materie zugrunde. Gammastrahlung ist eine Wellenstrahlung, die beim radioaktiven Zerfall von Atomen entsteht. Der Strahler ist demzufolge aus radioaktivem Material (Kobalt 60, Cäsium 137 oder Ameritium 241) [34] aufgebaut. Bei kleinen Meßprofilen (z. B. beim Mähdrescher am Elevator) wirkt sich dies durch den Einsatz eines leistungsschwachen Strahlers weniger bedenklich aus. Bei einer höheren Leistung des Strahlers, wie er bei größeren Querschnitten z. B. am Ladewagen nötig wäre, entstehen jedoch erhebliche lebensmittelrechtliche und gesundheitliche Bedenken.
- Durch die bereits erwähnte Nichtlinearität ist es grundsätzlich erforderlich, z.B. mit Hilfe eines Mikroprozessors, eine laufende Kennlinienlinearisierung durchzuführen. Ebenso sind die Einflüsse der ständigen Strahlenalterung mit zu berücksichtigen und über eine periodische Nachkalibrierung rechnerisch zu korrigieren. Dies bedingt derzeit noch relativ hohe Kosten, die zur Zeit wohl ausschließlich bei teuren Erntemaschinen wie z. B. bei Großmähdreschern vertretbar sind.

4. Zielsetzung

Bisher existierende technische Möglichkeiten der Gewichtsermittlung und damit auch der Ertragsermittlung bezogen sich nur auf die summarische Erfassung geernteter Güter über stationäre Waagen. Der fehlende Bezug zur Teilfläche sowie die Störung des Arbeitsablaufes erfordern die Integration der Gewichtsermittlung in die mobile Technik. Nachdem beim Mähdröschler als der zentralen Erntemaschine für Getreide und Kornfrüchte in den letzten Jahren die Möglichkeiten der Online-Ertragsermittlung geschaffen werden konnten, müssen auch im Futterbau Techniken zur Lösung dieses Problems gesucht werden. Nur so kann die Grundlage für eine betriebs- und flächendeckende Ertragsermittlung geschaffen werden, die wiederum der Ausgangspunkt für eine ökonomisch und vor allem ökologisch sinnvolle Pflanzenproduktion sein muß.

Im Bereich des Futterbaus bieten sich neben dem Ladewagen [43, 49] als zentrale Erntemaschine die Transportfahrzeuge (in der Regel ldw. Kippanhänger) und auch die Rundballenpresse zur Schaffung technischer Möglichkeiten der Ertragsermittlung an. Mit diesen drei Gerätetypen läßt sich das gesamte Spektrum des Futterbaus vom Grünfutter über das Rauhfutter bis hin zum Silomais abdecken.

Besonders zu beachten für den landwirtschaftlichen Einsatz sind folgende Punkte:

- Die Gewichtsermittlung muß aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und zur Erhöhung der Akzeptanz kostengünstig realisierbar sein.
- Den erhöhten Anforderungen an die Robustheit im landwirtschaftlichen Einsatz ist Rechnung zu tragen.
- Die Installation der Wiegetechnik soll nicht nur bei der Neuanschaffung der betreffenden Maschinen ermöglicht werden, sondern auch die Nachrüstmöglichkeit für bereits im Einsatz befindliche Technik bieten.
- Die Integration der Signalaufbereitung in eine bereits verfügbare Mobilelektronik oder in das zukünftige ldw. BUS-System muß möglich sein.

Für die praktische Realisierung bietet sich ein zweistufiges Verfahren an:

1.) **Integrierte Online-Gewichtsermittlung im Stand (statisch).**
Hier soll vor allen Dingen die Integration der Gewichtsermittlung in die Fahrzeuge unter Verwendung von bereits existierenden Sensortechniken oder Sensorsystemen untersucht werden. Es handelt sich dabei um eine absätzhige, statische Wiegung des Erntegutes zum Beispiel am Schlagende.

2.) **Integrierte Online-Gewichtsermittlung während der Fahrt (dynamisch).**

In dieser Stufe soll durch die Nutzung von leistungsfähiger Elektronik die Basis für eine dynamische Wiegung während des Ladens (on the go) geschaffen werden.

Für beide Verfahren sind die erreichbaren Genauigkeiten bei einem vertretbaren Aufwand der Sensorapplikation unter den vorher genannten Prämissen darzustellen und in Abhängigkeit vom Versuchsgegenstand und der jeweiligen Aufgabe zu diskutieren, wobei die im Mähdrescher erreichbare Genauigkeit ($\pm 2 \%$) als Zielgröße angestrebt werden muß.

5. Methodenwahl

Die Zielsetzung zur Integration der Gewichtsermittlung in ldw. Transport- und Futtererntefahrzeuge ist durch den Einsatz von handelsüblichen Sensoren oder Sensorsystemen ökonomisch sinnvoll zu realisieren. Die Erkenntnisse aus der Analyse der bereits existierenden Wiegesysteme im landwirtschaftlichen und im industriellen Bereich verringern allerdings die zur Verfügung stehende Auswahl an Technik erheblich. Zunächst können die volumetrisch und radiometrisch arbeitenden Sensorsysteme aufgrund der bereits erwähnten Nachteile in diesem Fall von vorneherein ausgeschlossen werden. Somit verbleibt die konventionelle Wägetechnik mit der Erfassung der Gewichtskraft über unterschiedlichste Kraftaufnehmer, bzw. Wägezellen.

Für die beschriebene Zielsetzung ist nach AUERNHAMMER [3, 4] die Möglichkeit der elektronischen Verarbeitung der anfallenden Daten eine unabdingbare Grundvoraussetzung. Damit wird erst der effiziente Einsatz der mittlerweile weitgehend verfügbaren elektronischen Datenverarbeitung möglich. Dies setzt den Einsatz von Sensoren voraus, die entweder analoge oder zukünftig vermehrt digitale elektronische Signale ausgeben. Mechanische Kraftmeßverfahren über Feder- oder Hebelmechanik scheiden deshalb aus, da ihre Anzeige unmittelbar am Meßort abgelesen werden muß und der Meßwert nicht als elektrische Größe zur Verfügung steht. Damit reduziert sich die Auswahl an Sensoren bzw. Sensortechniken weiter auf die elektromechanischen Kraftmeßsysteme.

Obwohl auch hier eine Vielzahl unterschiedlicher Techniken [34] existiert, ist es wiederum nur sinnvoll Sensoren zu suchen und zu untersuchen, die im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Robustheit und technische Möglichkeiten in Frage kommen. Folgende Anforderungen an die Gewichtsermittlung in ldw. Transportfahrzeugen und Futtererntemaschinen sind zu erfüllen [1, 4, 55]:

- Lastbereich entsprechend der zulässigen Gesamtlast des Fahrzeuges bzw. der zulässigen Achslast,
- dynamische Überlastsicherheit bis 250 % der Nennlast,
- Mindestauflösung von 1000 Teilen,
- hohe Linearität und Wiederholgenauigkeit bei geringer Hysterese,

- technische Lebensdauer der Sensorapplikation entsprechend der Abschreibungsdauer des Fahrzeuges von mindestens 8 - 10 Jahren,
- Stromversorgung aus dem Bordnetz 12 V= (ungeregelt),
- einfache Signalaufbereitung,
- niedriger Preis,
- Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse, Feuchtigkeit, Schwingungen und Temperaturschwankungen zwischen - 25 °C und + 85 °C (Spezifikation für industrielle Elektronikprodukte).

Aufgrund dieser Anforderungsliste und der Systemdefinition bieten die in der industriellen Wäge- und Kraftmeßtechnik eingesetzten Sensoren mit Dehnungsmeßstreifenapplikation durch ihre Typenvielfalt Einsatzvarianten für die unterschiedlichsten Wägaufgaben. Abbildung 4 zeigt die Einteilung dieser Sensortechnik, die durch die unterschiedliche technische Integration bedingt ist. Ausgehend von der Direktapplikation der Dehnungsmeßstreifen über die Dehnungsaufnehmer steigt der Grad der Integration bis hin zur fertig konfektionierten und mit einem normierten Ausgangssignal ausgestatteten Wägezelle [57, 68].

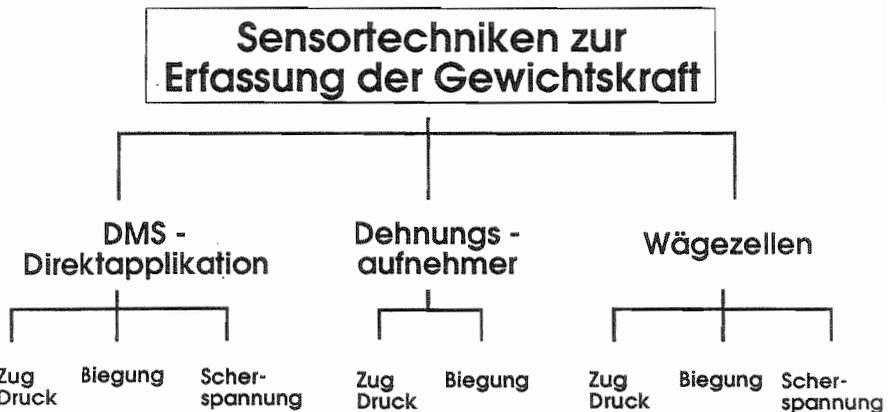


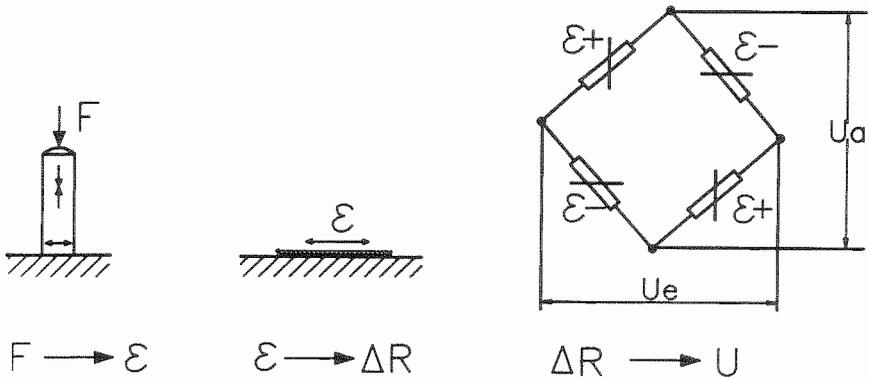
Abbildung 4: Sensortechniken zur Erfassung der Gewichtskraft.

5.1 Dehnungsmeßstreifen

Die durch eine Kraft hervorgerufene elastische Verformung eines Federkörpers kann als Dehnung oder Wegänderung zwischen zwei

Punkten des Verformungskörpers gemessen werden. Neben einer Vielzahl von mehr oder weniger aufwendigen Möglichkeiten der Erfassung dieser Längenänderung besteht eine der einfachsten und kostengünstigsten in der Applikation von Dehnungsmeßstreifen (DMS). Von allen Verfahren zum Messen von Kräften haben deshalb die Kraftaufnehmer mit DMS die größte Bedeutung erlangt [23, 44, 47, 69].

In der Abbildung 5 ist das Grundprinzip dieser Meßtechnik schematisch dargestellt.



F : Gewichtskraft
 ϵ : Dehnung
 ΔR : Widerstandsänderung
 U_a : Ausgangsspannung
 U_e : Eingangsspannung

Abbildung 5: Meßprinzip beim Dehnungsmeßstreifen (DMS) nach Schuster [61].

Danach bewirkt im ersten Schritt die auf einen Federkörper wirkende Kraft F nach dem Hookschen Gesetz dessen Dehnung (positiv) in Längsrichtung und dessen Kontraktion (negative Dehnung) in Querrichtung ($F \rightarrow \epsilon$). Diese Dehnung überträgt sich auf die Meßgitter der applizierten DMS. Unter dem Einfluß dieser Dehnung ändert sich der Widerstand des Meßgitters proportional zur einwirkenden Kraft (zweiter Schritt: $\epsilon \rightarrow \Delta R$).

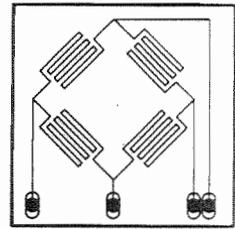
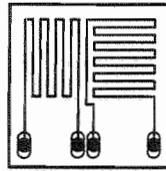
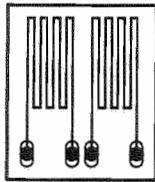
Diese Widerstandsänderung läßt sich im dritten Schritt über eine spezielle Brückenschaltung, der sogenannten "Wheatstoneschen Brücke", in ein proportionales elektrisches Signal umformen ($\Delta R \rightarrow U$). Bei der Verwendung von vier aktiven DMS (2 mit positiver und 2 mit negativer Dehnung beaufschlagte DMS) zur Beschaltung der Wheatstoneschen Brücke läßt sich das Ausgangssignal erhöhen und damit die Genauigkeit verbessern [22, 24]. Zusätzlich kann mit dieser Brückenschaltung eine weitgehende Temperaturkompensation erreicht werden: Die von einem Temperaturanstieg hervorgerufene Widerstandsänderung in allen vier aktiven DMS wirkt sich in der Brückenschaltung durch die Differenzbildung kaum auf das Ausgangssignal aus. Außerdem kann bei einer geschickten geometrischen Anordnung und Beschaltung in einer Wheatstoneschen Brücke der Einfluß von unerwünschten Nebenkräften [25] auf das Ausgangssignal verringert werden.

Allgemein kann das Dehnungsmessstreifenprinzip eine Reihe von vorteilhaften Eigenschaften [23] in sich vereinigen (Tab. 3):

Tabelle 3: Vorteile und Nachteile der DMS - Applikation [23, 34, 44, 47, 61, 69].

Vorteile	Nachteile
Niedriger Preis	Sorgfältige Applikation nötig
Hohe Meßgenauigkeit	Schutz vor mechanischen und sonstigen Umwelteinflüssen nötig
Erfassung positiver und negativer Dehnungen	Aufwendige Kalibrierung
Statische und dynamische Messungen möglich	
Hohe Wechsellastbeständigkeit	
Weiter Anwendungs- und Belastungsbereich	
Hohe Langzeitstabilität	
Weiter Anwendungstemperaturbereich	
Einfache Temperaturkompensation	
Individuelle Anpassung der Meßgitterform möglich	
Kleine Abmessungen des Sensorelementes	
Einfache Signalaufbereitung	

Neben DMS mit nur einem Meßgitter stehen für spezielle Erfordernisse auch Folien-DMS mit zwei oder vier Meßgittern zur Verfügung (Abb. 6).



BENENNUNG

Linear-DMS

Doppel-DMS
parallel

DMS-Rosette
T-Form

DMS-Vollbrücke
V-Form

ANWENDUNG

Dehnung in
einer Richtung

Einfach-Biege-
balken

Zug- und
Druckstäbe

Torsions- und
Scherstäbe

Abbildung 6: Grundtypen von DMS und deren typische Anwendung (nach Hoffmann [23]).

Folien-DMS bestehen üblicherweise aus speziellen Metallegierungen, die auf ein nichtleitendes Trägermaterial aufgebracht werden. Eine Ausnahme bilden DMS aus speziellen Halbleiter-Dotierungen (Ausgangsmaterial Silizium). Diese zeichnen sich im Vergleich zu den Metall-DMS durch wesentlich höhere Widerstandsänderungen und damit einem wesentlich höheren Ausgangssignal aus. Dies vereinfacht die Meßsignalverarbeitung erheblich und führt auch bei geringen Dehnungen zu einem genauen Ergebnis. Dem stehen als Nachteile gegenüber:

- Halbleiter-DMS sind wesentlich teurer als Folien-DMS,
- sie unterliegen einem starken Temperatureinfluß,
- es sind nur wenige Ausführungsformen verfügbar,
- die Applikation ist durch die hohe Brüchigkeit des Halbleitermaterials sehr schwierig.

Die DMS werden größtenteils mit speziellen Klebstoffen appliziert [26]. Abhängig von den gestellten Genauigkeitsanforderungen wird zwischen kalthärtenden (geringere Genauigkeit) und heißhärtenden Klebstoffen (Bau von Wägezellen hoher Genauigkeit) unterschieden. Für spezielle Anwendungen (hohe Temperaturen) können Sonder-

dehnungsmeßstreifen mit geeigneten Punktschweißgeräten aufgeschweißt werden. Die Schweißverbindung stellt jedoch einen Ausnahmefall der DMS-Applikation dar.

Die Applikation von DMS erfordert einen Spezialisten. Sie ist aber bei ausgebauten Bauteilen mit geringem technischen Aufwand durchführbar. Im eingebauten Zustand wird dies zwar erschwert, ist aber in der Regel ebenfalls durchführbar (Nachrüstung, Reparatur).

5.2 Dehnungsaufnehmer

Dehnungsaufnehmer stellen ein fertig konfiguriertes Meßelement mit Dehnungsmeßstreifenapplikation dar. Ähnlich wie beim Dehnungsmeßstreifen wird die auf ein Bauteil einwirkende Kraft über die erzeugte Dehnung erfaßt. Die Applikation von Dehnungsaufnehmern ist jedoch wesentlich einfacher als bei DMS. Die Verbindung zwischen dem kraftbeanspruchten Bauteil und dem Aufnehmer wird durch eine Schraubverbindung hergestellt.

Es existieren unterschiedliche Formen von Dehnungsaufnehmern (Abb. 7). Als Basis dienen Dehnungsmeßstreifen, die auf den speziell geformten Federkörpern als Halbrücke oder als Wheatstonesche Vollbrücke mit sämtlichen Abgleich- und Kompensationswiderständen verschaltet sind. Durch einige technische Details konnten die unterschiedlichen Hersteller eine höhere Empfindlichkeit der Sensoren erreichen. So besitzen die Federkörper eine besondere geometrische Bauform, die eine optimale Übertragung der abgegriffenen Dehnung auf die applizierten DMS erlaubt.

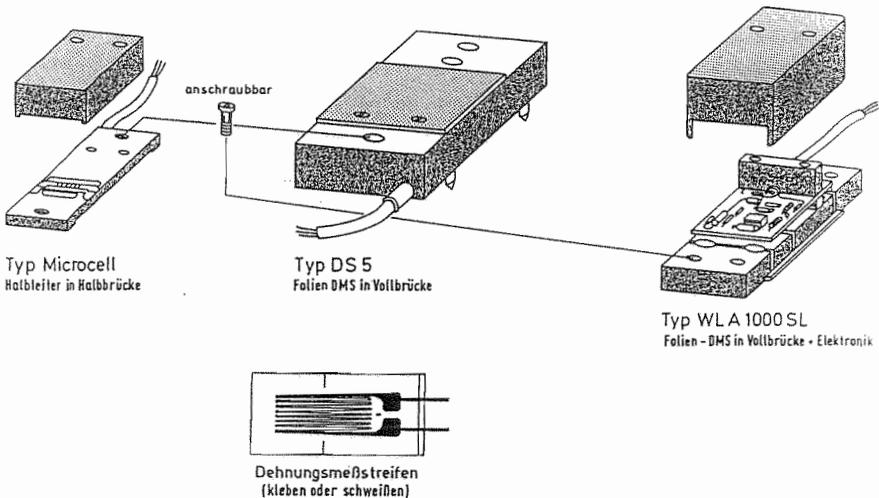


Abbildung 7: Bauarten von Dehnungsaufnehmern.

Beim Typ Microcell bestehen die DMS aus Silizium-Halbleitern. Dadurch wird die Dehnungsempfindlichkeit des Sensors um das Fünffzigfache erhöht.

Eine noch elegantere Lösung zur Erhöhung des Ausgangssignals bietet der Aufnehmer vom Typ WLA 1000 SL. Hierbei wird das Kleinsignal der DMS-Vollbrücke durch eine integrierte Verstärkerelektronik in ein Großsignal gewandelt. Damit ist ein komplettes, integriertes Sensorsystem verwirklicht.

Die Aufgaben im industriellen Einsatz reichen von der Füllstandsmessung bei Siloanlagen (Gewichtsermittlung) bis zur Preßkraftüberwachung an Werkzeugmaschinen (Überlastsicherung). Der Hauptvorteil dieser Technik liegt in der nachträglichen einfachen Montage an bereits bestehenden Konstruktionen. Es besteht allerdings nur die Möglichkeit, Dehnungen in einer Wirkungsrichtung zu erfassen. So können Zug- und Druckspannungen und bis zu einer gewissen Grenze Biegespannungen aufgenommen werden.

Die maximale Belastbarkeit liegt abhängig vom jeweiligen Sensor bei einer Dehnung von $\pm 200 \mu\text{m}$ bis $\pm 1000 \mu\text{m}$ (entsprechend 0,2 bis

1 mm). Diese ist durch die höhere Empfindlichkeit deutlich geringer als bei der Direktapplikation von DMS. Das durch die Last deformierte Bauteil muß in diesem Fall relativ robust ausgelegt sein. Gerade diese Anforderung ist jedoch bei den konstruktiv massiven Elementen an Landmaschinen in der Regel mehr als erfüllt.

5.3 Bohrlochensoren

Auf ein Bauteil wirkende Kräfte rufen nicht nur Dehnungen an dessen Oberfläche hervor sondern bewirken auch unterschiedliche Spannungen im Inneren des Objektes. Sogenannte Bohrlochensoren nutzen diesen Umstand und wandeln die Spannungen im Innern eines verformten Bauteils in ein kraftproportionales Signal um. Abhängig von der Applikation und der Applikationsstelle können außer Zug- und Druckkräften auch Biege- und Scherkräfte erfaßt werden. Beispielhaft wird der Einsatz dieses Sensors im Hubarm eines Schleppers [1, 2] in Abbildung 8 dargestellt.

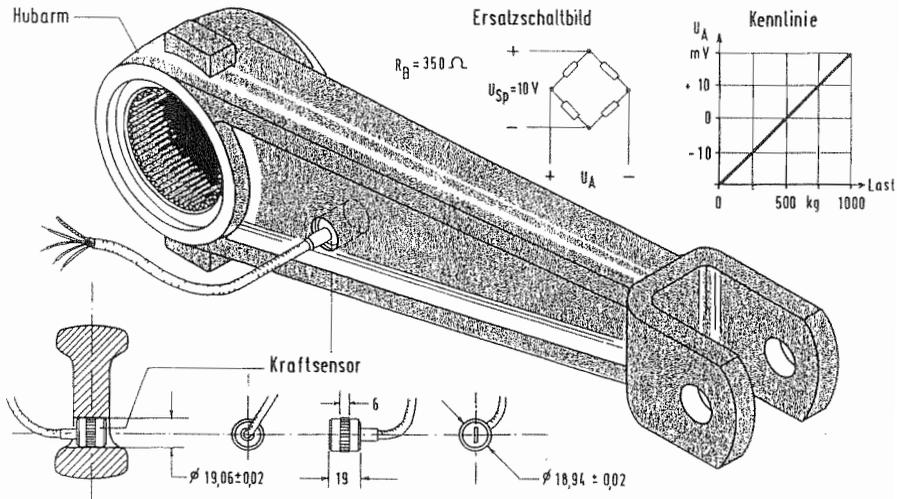


Abbildung 8: Bohrlochensensor GOZINTA in einem Hubarm.

Der im Durchmesser ca. 19 mm starke Sensor wird in eine Exaktbohrung eingepreßt. Das Bauteil wird in diesem Anwendungsfall ausschließlich auf Biegespannung beansprucht. Der Sensor nimmt dagegen in dieser Einbaulage die entstehende Druckspannung auf. Der hermetisch dichte Edelstahlkörper (Typ Gozinta) ist mit einer abgeglichenen DMS-Vollbrücke bestückt. Zum Einpressen des Sensors wird eine spezielle Vorrichtung benötigt, damit die Mantelflächen einen exakten Kraftschluß zum Meßobjekt besitzen und gleichzeitig eine Verspannung des Sensors ausgeschlossen werden kann.

Bei einer anderen Neuentwicklung wird Kontakt durch einen Spezialkleber hergestellt. Dadurch wird die Anwendung erheblich vereinfacht, zugleich aber die erzielbare Genauigkeit reduziert.

Die Bohrung führt zu einer Verringerung des Querschnitts und damit zu einer Schwächung des belasteten Bauteils. Dadurch ergibt sich der Vorteil einer höheren Empfindlichkeit bei massiven Ausführungen. Bei kleineren Abmessungen kann dagegen dieser Sensor nicht eingesetzt werden, weil dort eine Überlastung des beanspruchten Bauteils bis hin zum Bruch möglich wird. Damit sind die Anwendungsmöglichkeiten dieses Sensors erheblich eingeschränkt. Neben dem Preis von 400 DM je Sensor (Typ Gozinta) ist aber auch der Aufwand für den Einbau und die damit verbundenen Kosten mit zu berücksichtigen.

Die Genauigkeit dieser Technik wird von verschiedenen Faktoren überlagert und ist weniger von der Grundgenauigkeit des Sensors abhängig. Insbesondere sind folgende Punkte zu beachten:

- Maximale Spannung des Bauteils und damit Empfindlichkeit des Systems. Dieser Parameter läßt sich durch die Suche nach der optimalen Applikationsstelle oder einer gezielten Schwächung des Querschnittes stark beeinflussen.
- Exaktes Applizieren und Justieren des Sensors.
- Vermeidung von Einwirkungen durch Nebenkräfte oder Kraftnebenschlüsse, die sich über das Bauteil auf den Sensor fortpflanzen.
- Beachtung eines möglichen Temperatureinflusses auf das Bauteil. Er wirkt sich im Gegensatz zum Temperatureinfluß auf den Sensor (der weitgehend kompensiert werden kann) als Meßfehler aus.

5.4 Wägezellen

Nach der Waagenbaunorm DIN 8120 [34] ist die Wägezelle ein Meßglied für die elektrische Messung von Gewichtskräften. In der Kraftmeßtechnik wird die Bezeichnung "Kraftaufnehmer" verwendet. Demnach ist die Wägezelle ein besonderer Kraftaufnehmer für wägetechnische Zwecke.

In der Abbildung 9 ist in Form eines Blockschaltbildes die elektromechanische Umwandlung eines mechanischen Eingangssignals, der Gewichtskraft, in ein proportionales elektrisches Meßsignal dargestellt. Neben der hier wiedergegebenen DMS-Wägezelle als elektromechanischen Wandler gilt dies auch für jedes andere physikalische Wandlerprinzip [18].

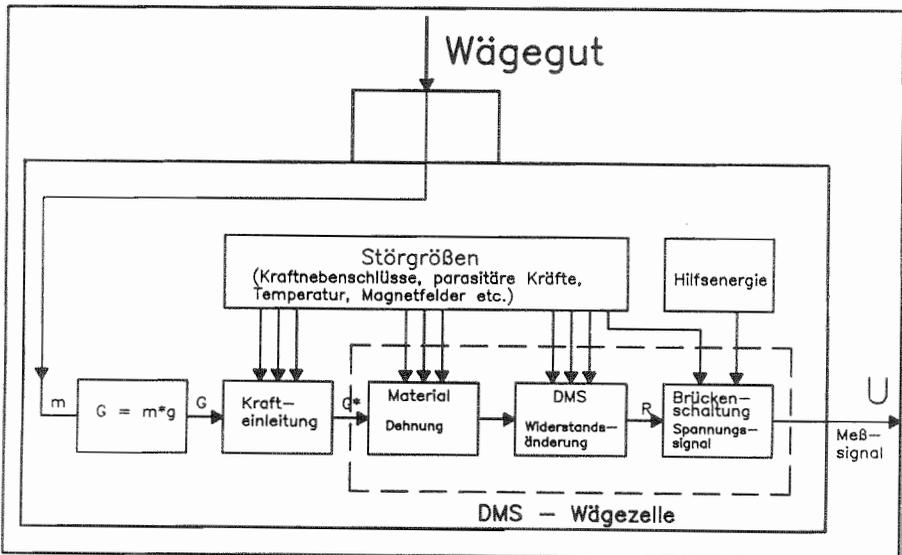


Abbildung 9: Wägezelle als elektromechanischer Wandler (nach Schuster [61]).

Die vom Wägegut ausgeübte Gewichtskraft G führt in der Wägezelle an der DMS-Meßstelle zu einer Dehnung des Materials. Wie bereits in Abbildung 5 dargestellt wird diese mechanische Größe in eine elektrische Größe umgewandelt. Auf die einzelnen Stufen können

dabei unterschiedliche Störgrößen einwirken und das Meßergebnis verfälschen. Von der Vielzahl der möglichen Wandlerprinzipien haben sich nur wenige im wägetechnischen Einsatz (Tab. 4) bewährt [61].

Tabelle 4: Übersicht der wichtigsten Meßprinzipien bei Wägezellen (nach Schuster [61]).

Wirkprinzip	Schwingsaite	Magnetoelastizität	Wegmessung -induktiv -kapazitiv -ohm'sch	DMS (Metall)
Ausführungsform (symbolisch)				
physikalisches Prinzip	Frequenzmessung	Magnetfeldänderung	Wegmessung	Widerstandsänderung
Nennlastbereich	< 1 kg	0,1 - 1000 t	1 g - 1000 t	1 kg - 1000 t
Meßweg	< 0,2 mm	< 0,5 mm	< 1 mm	< 0,5 mm
Linearitätsfehler	< 0,02 %	> 1 %	> 0,5 %	< 0,02 - 1 %
für Wägezelle geeignet	ja	bedingt	nein	ja
Bemerkung	nicht hermetisch dicht	stark nichtlinear sehr robust	geringe Genauigkeit, stark temperaturabhängig	weitverbreitetes Wandlerprinzip f. Industriewaagen

Das Schwingsaiten-Meßprinzip eignet sich durch seinen geringen Nennlastbereich nur sehr bedingt für Industriewaagen. Sein Einsatzbereich liegt in Verbindung mit Hebelübersetzungen bei Hybridwaagen.

Das magnetoelastische Prinzip ist durch die geringe Genauigkeit kaum für wägetechnische Aufgaben einsetzbar. Dagegen findet diese Technik in Form von Meßbolzen zur Erfassung von Zugkräften als Steuerungsparameter in elektronischen Hubwerksregelanlagen eine weit verbreitete Anwendung [12, 37]. Durch die robuste Auslegung besteht eine besondere Eignung für diese Aufgabe.

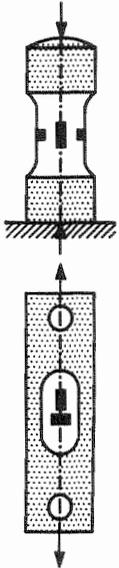
Die Wegmessung ist als Meßprinzip für Wägezellen durch die geringe Genauigkeit und die starke Temperaturabhängigkeit ungeeignet.

Dagegen hat sich aufgrund der besonderen Eigenschaften der Dehnungsmeßstreifentechnik (siehe Kapitel 5.1) das darauf basierende Wandlerprinzip in der industriellen Wägetechnik insbesondere im Nennlastbereich von 10 kg - 100 t durchgesetzt [61]. Moderne DMS-Wägezellen haben heute einen technischen Stand erreicht, der an Meßgenauigkeit und Wirtschaftlichkeit von keinem anderen Umformprinzip erreicht wird.

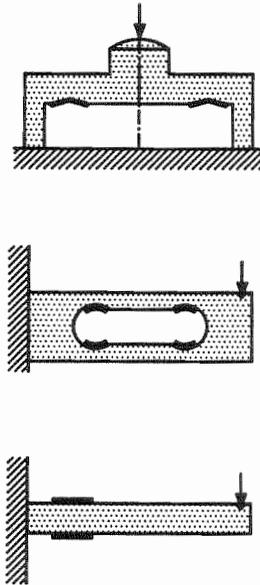
5.4.1 DMS - Wägezelle

Eine Wägezelle besteht aus einem relativ steifen Federelement, auf dessen Oberfläche an einer geeigneten Stelle DMS aufgebracht sind. Für die eigentliche Messung wird nur ein kleiner Bereich auf der Oberfläche der Meßfeder benötigt, der von unerwünschten äußeren Einflüssen möglichst unbeeinflusst [71] bleiben muß und dessen Dehnung in möglichst idealer Weise der zu messenden Last proportional ist [48]. Daraus ergeben sich für die unterschiedlichsten Anwendungsbereiche vielfältige Ausführungsformen der Meßfedern und damit der Wägezellen (Abb. 10).

Zug und Druckbelastung



Biegebelastung



Scherbelastung

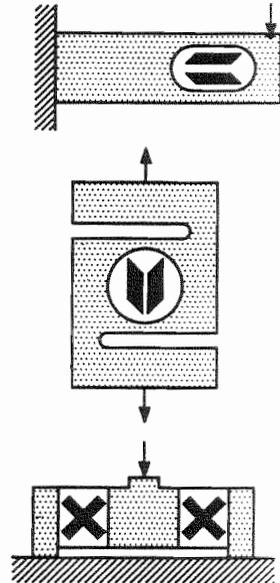


Abbildung 10: Ausführungsformen von Wägezellen.

Als Auswahlkriterien für die geeignete Meßkörperperform können der Lastbereich, die Einbauhöhe, die Einbaulage oder die auftretenden Störkräfte dienen.

Die Eigenschaften des Federkörpers und somit des gesamten Meßgrößenaufnehmers werden neben Geometrie sehr stark von dem verwendeten Werkstoff bestimmt. An den Werkstoff werden folgende Grundanforderungen gestellt [9, 11, 23] :

- Feinkörniges, homogenes Gefüge,
- hohe elastische Verformbarkeit, gekennzeichnet durch hohe Festigkeit und hohe Streckgrenze,
- gutes Kriechverhalten,
- geringe Hysterese,
- gute Wärmeleitfähigkeit.

Diese Anforderungen werden in besonderem Maße von höher legierten Stählen und speziellen Federstählen erfüllt.

Das elektrische Ausgangssignal ist abhängig von der Speisespannung der Verstärkerelektronik und bezieht sich auf die Nennlast der Wägezelle. Die Wägezellen werden meist auf einen fixen Wert (2 mV pro V Versorgungsspannung oder 3 mV/V) abgeglichen. Dies ist Grundvoraussetzung zum Parallelschalten von mehreren Aufnehmern. Damit kann jederzeit eine defekte Wägezelle gegen eine andere ohne eine Neukalibrierung des Wiegesystems ausgetauscht werden. Ebenso kann bei einem bekannten Ausgangssignal die Kalibrierung auf rein rechnerischem Wege erfolgen [44].

Aus der Tabelle 5 sind Vor- und Nachteile von DMS-Wägezellen [61] zu ersehen:

Tabelle 5: Vor- und Nachteile von DMS-Wägezellen.

Vorteile	Nachteile
Hohe Genauigkeit	Geringe Überlastfestigkeit besonders bei dynamischer Beanspruchung
Definiertes elektrisches Ausgangssignal ermöglicht Parallelschaltung mehrerer Wägezellen	Optimale Krafteinleitung und Entkopplung von Nebenkräften erforderlich
Einfache Meßsignalaufbereitung	Bauliche Anpassung des Lastträgers nötig
Signalaufbereitung im Sensor möglich	
Vielseitige Verwendbarkeit für mehrere Meßaufgaben	
Günstiger Stückpreis ab ca. 400 DM durch Großserienfertigung	

Die geringe Überlastfestigkeit kann durch eine Überdimensionierung der Wägezellen vermieden werden. Beim Einbau von Wägezellen in vorhandene Konstruktionen sind jedoch in Abhängigkeit von der Wiegeaufgabe meistens konstruktive Änderungen an den vorhandenen Bauteilen zur Optimierung der Krafteinleitung nötig.

5.4.2 Elastostatische Wägezelle

Ein weiteres elektromechanisches Umformprinzip nützen die neu entwickelten elastostatischen Wägezellen. Bei der elastostatischen Kraftmeßzelle (kurz ELS) wird eine in das System eingeleitete Kraft über ein Kolben-/Zylindersystem in Druck umgewandelt (siehe Abb. 11). Dieser Druck wirkt auf einen entsprechenden Drucksensor, der ein zur Kraft proportionales elektrisches Signal liefert.

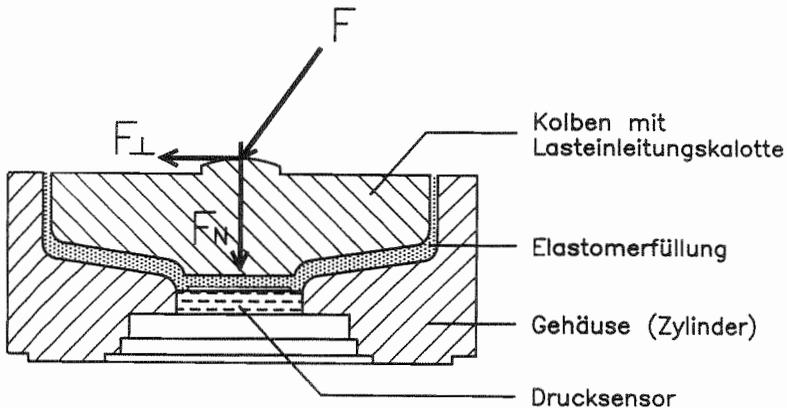


Abbildung 11: Elastostatische Wägezelle.

Im Gegensatz zur üblichen Druckmessung wird allerdings der Druck nicht in einem flüssigen oder gasförmigen, sondern in einem festen Medium aufgebaut. Dieses Medium besteht aus einem Elastomer, das den minimalen Spalt zwischen Kolben und Zylinder ausfüllt. Durch die Vulkanisation der Mantelflächen mit dem Elastomer entsteht eine fast unlösbare Verbindung.

Der Hauptvorteil dieses Kolben-/Zylindersystems liegt in der Kräftezerlegung. Von einer Kraft F , die auf den Kolben wirkt, läßt nur die Kraft F_N in Kolbenlängsachse ein Verschieben des Kolbens zu. Sonstige Kräfte werden über das Gehäuse abgeleitet und haben damit keinen Einfluß auf das Meßergebnis.

Mit diesem Aufbau sind alle denkbaren Formen eines Kolben-/Zylindersystems zu realisieren. So sind zum Beispiel rohr-, ring- oder scheibenförmige Aufnehmer denkbar. Bei größeren Querkraften

mit Biegemomenten ist eine gewisse Mindestspaltlänge und damit Mindesthöhe des Sensors einzuhalten, um zu vermeiden, daß der Kolben aus dem Zylinder gezogen werden kann. Allerdings können nur positive Kräfte erfaßt werden.

Das eigentliche Meßorgan, der Drucksensor, besteht aus einem hutförmigen Keramikkörper mit in Dickschichttechnologie applizierten Dehnungsmeßstreifen. In Zukunft soll dieser Drucksensor als einschraubbare Druckkerze mit integrierter Verstärkerelektronik produziert werden. Damit muß im Störfall nicht mehr die eingebaute Wägezelle aus einer Konstruktion entfernt werden, sondern es wird lediglich der Austausch dieser Druckkerze vorgenommen. Diese ELS-Kraftmeßzellen sollen aufgrund ihrer hervorragenden dynamischen Eigenschaften künftig vor allem im Kfz- und Lkw-Bereich zur Lastermittlung und zur Erfassung unterschiedlichster Kräfte für die Fahrwerksoptimierung eingesetzt werden. Dieser Einsatz ist vergleichbar mit den Gegebenheiten bei landwirtschaftlichen Transportfahrzeugen. Daraus eröffnet sich eine zukünftige Möglichkeit zur Großserienfertigung von ELS-Kraftmeßzellen zu niedrigen Kosten auch für unterschiedliche Einbausituationen.

Zusammenfassend erfüllen diese Druckmeßdosens folgende Anforderungen (Tab. 6):

Tabelle 6: Vor- und Nachteile von elastostatischen Wägezellen.

Vorteile	Nachteile
Einfache Adaptierbarkeit	Nur für positive Kräfte
Kräftezerlegend	Bestimmte Bauhöhe erforderlich
Überlastbarkeit	Entwicklungsstadium noch nicht abgeschlossen
Hohe Genauigkeit	
Langzeitstabilität	
Niedrige Kosten	
Einfacher Austausch des Drucksensorelementes	
Gute dynamische Meßeigenschaften	
Einfache Signalverarbeitung	

5.5 Dehnungsmessungen und Spannungsanalysen für unterschiedliche Lastfälle

Zum möglichen Einsatz der obengenannten Sensoren und Sensortechniken zur Erfassung von Gewichtskräften in Fahrzeugen müssen zunächst die auftretenden Spannungs- und Belastungsfälle geklärt sein. In der Regel handelt es sich um eine Überlagerung der elementaren Spannungsfälle [13, 33]

- Zug-/Druckspannung,
- Biegespannung,
- Scherspannung (bzw. Torsion)

5.5.1 Zug-/Druckspannung

Bei einem auf Zugspannung beanspruchten Bauteil entsteht, wie aus der Abbildung 12 ersichtlich, in der Kraftwirkungsrichtung eine positive Längsdehnung und in der Querrichtung eine negative Querdehnung durch Kontraktion. Bei einer Druckspannung ist dagegen die Längsdehnung negativ und die Querdehnung positiv.

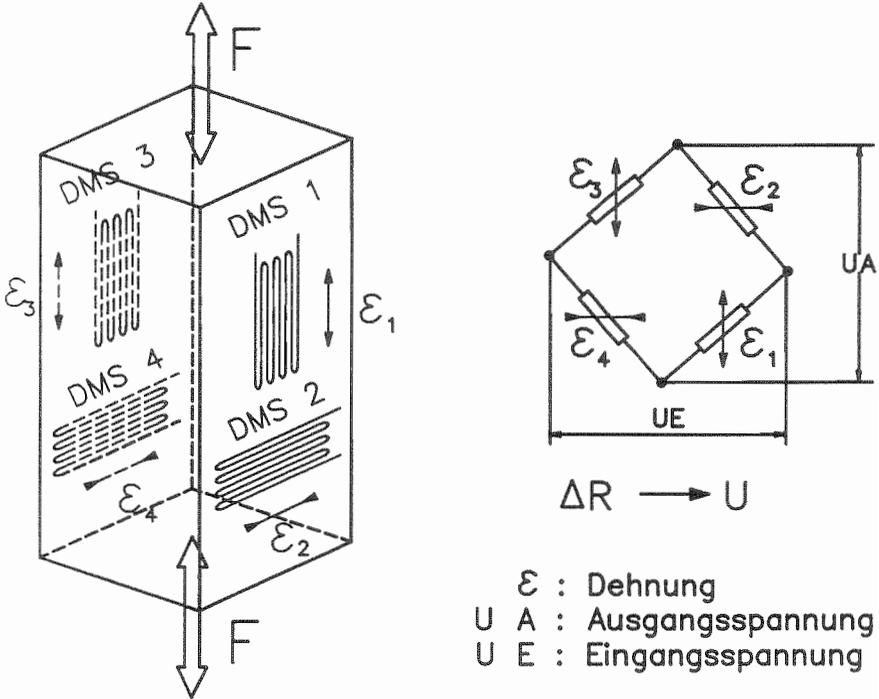


Abbildung 12: Kraftmessung am Zug-/Druckstab.

Neben der Applikation der DMS ist hier auch beispielhaft die Beschaltung zur Wheatstoneschen Brücke zu sehen. Bei dieser Vollbrückenschaltung (4 aktive DMS) werden überlagerte Störgrößen in Form von Biege- und Wärmedehnungen gut kompensiert. Bei Zug- und Druckkraftaufnehmern wird der Querschnitt an der Meßstelle stark reduziert um eine ausreichende Empfindlichkeit zu erreichen. Die Aufnehmer müssen allerdings gegen Seitenkräfte durch konstruktive Maßnahmen geschützt werden.

Bei der Messung von Druck- oder Zugspannung an massiven Maschinenbauteilen treten nur geringe Dehnungen (bis ca. 100 μm) auf. Dementsprechend gering ist die Empfindlichkeit und damit die Auflösung. Durch eine Verringerung des Querschnittes oder durch die Wahl eines Werkstoffes mit kleinerem Elastizitätsmodul läßt sich die Dehnung erhöhen. Dem sind allerdings Grenzen gesetzt [23, 32].

Bei der Messung kleinerer Kräfte scheidet deshalb die direkte Werkstoffbelastung durch Normalkräfte weitgehend aus. Hier bietet sich die Kraftübersetzung mittels Hebelarm, also des Biegemomentes an.

5.5.2 Biegespannung

In der Abbildung 13 wird an einem einfachen Biegestab der Verlauf der Hauptdehnungen bei der Biegespannung dargestellt [23]. Dabei ist zu erkennen, daß das erzeugte Biegemoment (Produkt aus Kraft * Kraftarm) auf einer Seite des gebogenen Stabes eine positive Dehnung und auf der gegenüberliegenden Seite eine negative Dehnung hervorruft. Ebenso wechselt die Dehnung über den Querschnitt das Vorzeichen. Bei einem spiegelsymmetrischen Querschnitt des Biegestabes sind beide betragsmäßig gleich groß. Dies bietet bei einer DMS-Vollbrückenapplikation (4 aktive DMS) bei der Beschaltung zu einer Wheatstoneschen Brücke die Möglichkeit einer weitgehenden Kompensation von Störgrößen wie z. B. auftretende Zug- und Druckspannungen, Torsionen oder Wärmedehnungen.

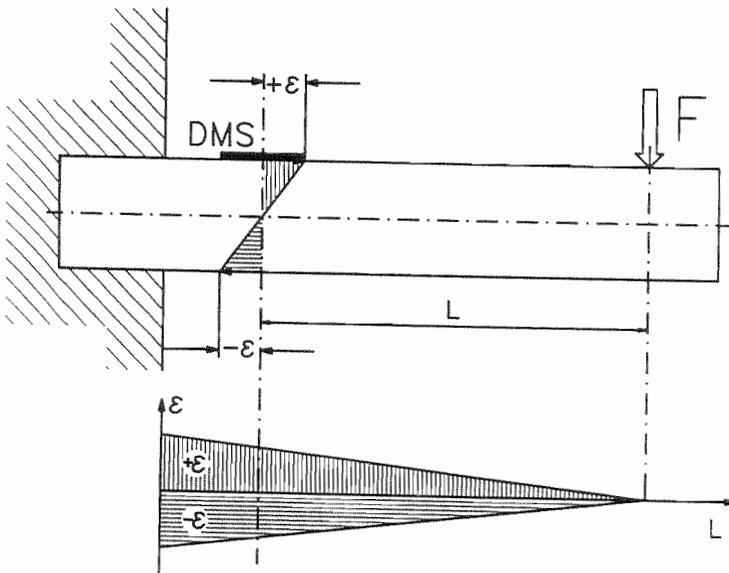


Abbildung 13: Spannungsverlauf und Dehnungen am Biegebalken.

Der Hauptvorteil der Biegespannung liegt neben der sehr guten Linearität in der Größe der auftretenden, kraftproportionalen Dehnungen. Diese sind durch die geometrische Gestaltung (Länge des Hebelarms) der Lasteinleitung und durch die Änderung des Querschnittes in weiten Bereichen manipulierbar. In diesem Fall ist weniger die Querschnittsfläche, sondern vielmehr die Form und das damit verbundene Biege-Widerstandsmoment von entscheidender Bedeutung.

Im praktischen Einsatz entstehen jedoch zwei wesentliche Nachteile dieser Anordnung:

- Es muß ein definierter, unveränderlicher Krafteinleitungspunkt vorhanden sein. Bei einem sich ändernden Krafteinleitungspunkt wird das Meßergebnis in Abhängigkeit von dieser Änderung erheblich verfälscht.
- Bei einer nur einseitig möglichen Abnahme der Dehnung geht die Temperatur als Störgröße mit ein.

Zur Vermeidung dieser Nachteile bietet sich als Alternative die Erfassung der Scherspannung an.

5.5.3 Scherspannung

Scherspannungen finden sich in reiner Form z. B. an tordierten Wellen. Die daraus entstehenden Hauptdehnungen treten unter ± 45 Grad zur Scherungsebene mit entgegengesetzten Vorzeichen auf. Bei einem auf Scherung beanspruchten Balken (Abb. 14) ändert sich infolge der gegenseitigen Überlagerung von Scher - und Biegespannung die Winkellage des Hauptspannungs-/Hauptdehnungskreuzes in Abhängigkeit vom Verhältnis Scherspannung zu Biegespannung. Die Scherspannung wird nur in der neutralen Mittelachse (keine überlagerte Biegespannung) unter einem Winkel von ± 45 Grad optimal erfaßt. An der Ober- und Unterseite des beanspruchten Bauteils läßt sich dagegen lediglich die Biegespannung erfassen. Diese erreicht über den Querschnitt betrachtet an dieser Stelle den Maximalwert während die Scherspannung auf Null zurückgeht. In der Abbildung wird dieser Umstand durch das horizontale Hauptspannungs-/Hauptdehnungskreuz veranschaulicht.

Über die Länge betrachtet ändert sich dagegen die Größe der Scherspannung im Gegensatz zur Biegespannung nicht. Somit ist die Scherspannung unabhängig vom Lastangriffspunkt. Sie ändert sich ausschließlich mit der Größe der angreifenden Last.

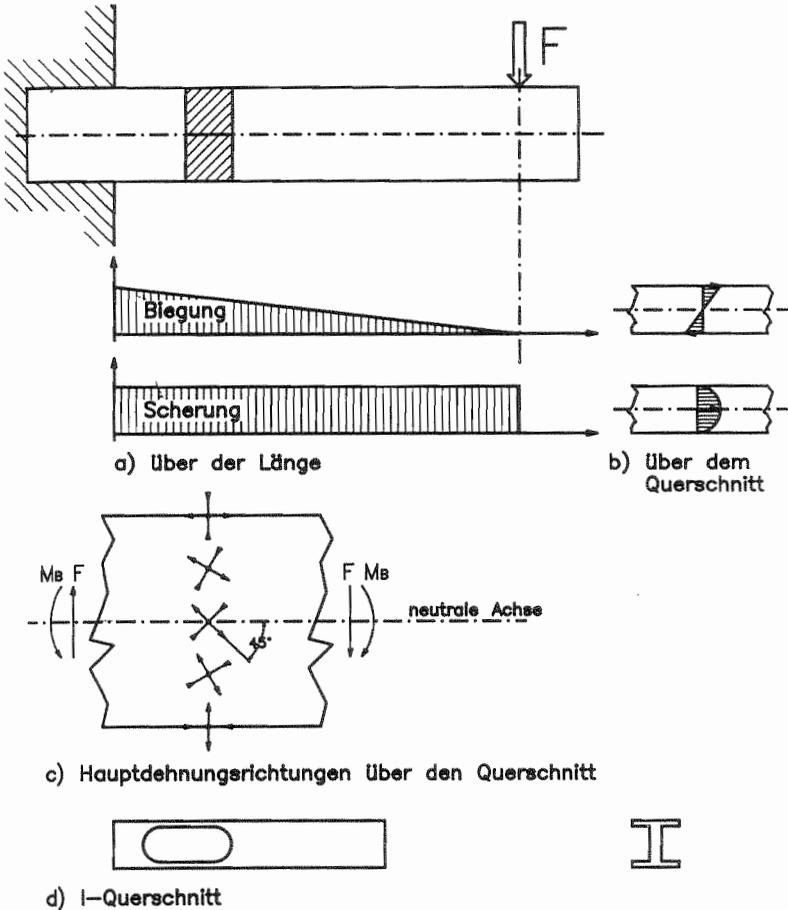


Abbildung 14: Die Richtungen der Hauptdehnungen am Scherstab mit überlagerten Biege- und Scherspannungen.

Die Überlagerung durch eine Biegespannung läßt sich durch die Schaffung eines I-Querschnittes (Doppel-T) und damit eines möglichst großen Biege-Widerstandsmomentes an den Oberflächen des

Balkens weitgehend verringern. Damit ergibt sich zudem der Vorteil, daß die relativ geringen Dehnungen, die durch die Scherspannung hervorgerufen werden, durch die Verringerung des Querschnittes wesentlich erhöht werden können und damit durch die höhere Empfindlichkeit das Meßergebnis verbessert wird.

Folgende Vorteile sprechen für eine Scherspannungsmessung:

- Das Meßsignal ist unabhängig vom Kraftangriffspunkt,
- überlagerte Zug- und Druckspannungen sowie Wärmedehnungen werden weitgehend eliminiert,
- mit einem I-Profil läßt sich trotz eines geringen Querschnittes eine hohe Stabilität erreichen,
- das Meßsignal besitzt eine sehr gute Linearität mit geringer Hysterese.

Dem stehen nur zwei Nachteile gegenüber:

- Ohne eine Schwächung des Querschnittes sind die entstehenden Dehnungen sehr gering und erfordern eine sorgfältige Signalaufbereitung,
- überlagerte Torsionen können in Abhängigkeit von der Beschaltung das Meßergebnis verfälschen.

5.6 Zusammenfassende Einordnung

Die vorliegende Beschreibung führt zu einer Vielzahl von technisch realisierbaren Möglichkeiten für die Untersuchung der Gewichtsermittlung in landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Zugleich zeichnen sich jedoch bereits verschiedene Schwerpunkte für den Einsatz der jeweiligen Sensoren bzw. Sensortechniken ab. In der Tabelle 7 sind die unterschiedlichen Sensortechniken in Hinsicht auf Genauigkeit, Preise, Robustheit und technischen Aufwand bei der Applikation gegenübergestellt.

Tabelle 7: Einordnung der unterschiedlichen Sensortechniken.

Wertung	gering	mittel	hoch
Fehler	Wägezelle	DMS	Dehnungsaufnehmer Bohrlochsensor
Preise	DMS	Bohrlochsensor	Wägezelle Dehnungsaufnehmer
Störanfälligkeit	DMS Bohrlochsensor	Wägezelle	Dehnungsaufnehmer
technischer Aufwand	Dehnungsaufnehmer	DMS	Wägezelle Bohrlochsensor

Daraus ergibt sich folgende Beurteilung:

- Die DMS-Direktapplikation ermöglicht bei vertretbarem Aufwand und ausreichender Genauigkeit eine preisgünstige und robuste Lösung.
- Beim Einsatz von Wägezellen läßt sich der Fehler verringern. Allerdings führt dies zu höheren Investitionen und zu einem höheren technischen Aufwand.
- Demgegenüber schneidet die Anwendung von Dehnungsaufnehmern, bzw. Bohrlochsensoren - bedingt durch die geringere Genauigkeit - ungünstiger ab, obwohl besonders bei Dehnungsaufnehmern die einfache Anbringung Vorteile in der Fertigung mit sich bringt.

6. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Beim Versuchsaufbau wurde in Anlehnung an diese Ergebnisse eine optimale Verknüpfung der technischen Anforderungen der Sensoren mit den baulichen Gegebenheiten der Fahrzeuge angestrebt. Die folgenden Versuche wurden an repräsentativen Fahrzeugen durchgeführt. Dies bezieht sich zum einen auf die technische Ausstattung und zum anderen auf die im süddeutschen Einsatzgebiet relevanten Gegebenheiten.

6.1 Untersuchte Ernte- und Transportfahrzeuge

Bei der Wahl der zu untersuchenden Transport - und Erntefahrzeuge mußten zunächst die unterschiedlichen Bauformen, die im landwirtschaftlichen Bereich überwiegend zum Einsatz kommen, berücksichtigt werden (Abb. 15) [41, 43, 49].

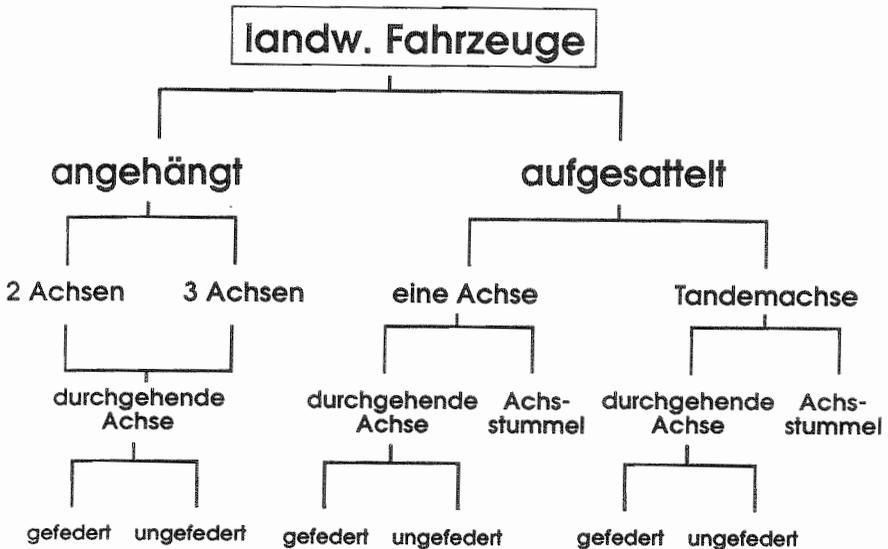


Abbildung 15: Einordnung ldw. Transport - und Erntefahrzeuge.

Als Hauptunterscheidungskriterien sind hier die Anhängart, die Achsenzahl, die Achsenform und die Federung zu nennen. Entsprechend der Zielsetzung ist die Wiegetechnik in Fahrzeugen nur dann sinnvoll, wenn sie zu annehmbaren Preisen für den Landwirt zu verwirklichen ist. Aus dieser Sicht ergeben sich wesentliche Grundüberlegungen für die Realisierung und den Einsatz der Technik:

- Der bauliche Aufwand an den Fahrzeugen muß so gering wie möglich sein,
- Bauteile oder Konstruktionselemente, die einen universellen Einsatz an verschiedenen Fahrzeugen ermöglichen, sind zu bevorzugen,
- die Nachrüstmöglichkeit für ältere Fahrzeuge sollte ohne erheblichen finanziellen oder technischen Mehraufwand gewährleistet sein,
- für Reparaturarbeiten sollten die sensorbestückten Bauteile gut zugänglich und nötigenfalls leicht austauschbar sein.

Die Untersuchung der Fahrzeugrahmen auf mögliche Ansatzpunkte für die Integration der Wägetechnik ergab bei der Vielzahl der Bauformen keine einheitliche Lösungsmöglichkeit für verschiedene Fahrzeuge. Nur die baulich äußerst aufwendige Konstruktion eines Doppelrahmens würde einen optimalen Einsatz von Wiegesensorik ermöglichen. Dies verbietet sich allerdings aus den oben genannten Gründen.

Trotz dieser umfangreichen Anforderungsliste lassen sich aus den unterschiedlichen Fahrzeugformen, die wiederum für den Aufbau von verschiedenen Fahrzeugtypen Verwendung finden, einige bauliche Gemeinsamkeiten herausfiltern.

Überwiegend werden in der Landwirtschaft Einachs-, Zweiachs- und Tandemachsfahrzeuge eingesetzt. Während sich beim Zweiachser die gesamte Last über die Achsen als Achslast bzw. über die Räder als Radlast abstützt, ergibt sich beim aufgesattelten Anhänger (Ein- oder Tandemachser) eine Aufteilung (Abb. 16) in die Achslast und die über die Deichsel auf die Anhängervorrichtung am Schlepper aufgebraachte Deichsel- oder Stützlast [51]. Somit bieten sich die Achsen und deren Verbindungselemente zum Rahmen sowie die Deichsel und die Anhängerkupplung am Schlepper als Ansatzpunkt für ein

integriertes Wiegesystem an. Damit könnten die gestellten Anforderungen weitgehend erfüllt werden.

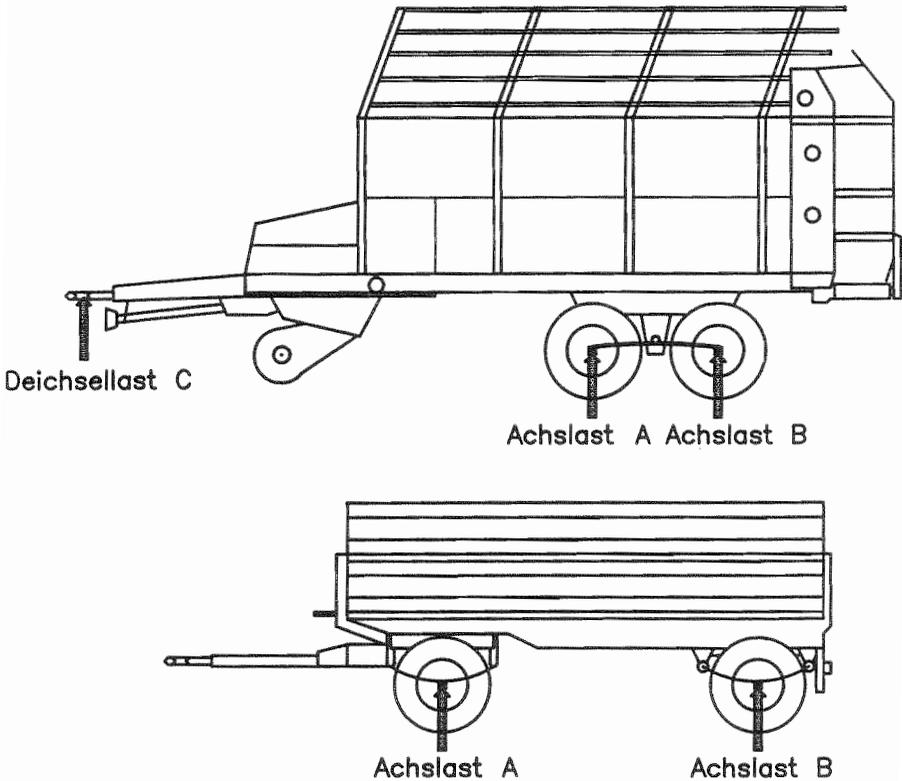


Abbildung 16: Verteilung der Gewichtskräfte in ldw. Fahrzeugen.

Einige aufgesattelte Fahrzeuge weisen jedoch in Bezug auf die Achsen eine Besonderheit auf. Bedingt durch die Bauform des Fahrzeuges (Rundballenpresse) oder des Fahrwerkes (Pendelachse und manche Tandemachsen) werden anstatt der durchgehenden Starrachsen kurze Achsstummel eingesetzt. Dadurch wird der Einsatz von einigen Sensortechniken erschwert.

Aufbauend auf diese Zusammenhänge wurden für die Untersuchungen 3 verschiedene Fahrzeugtypen ausgewählt (Tab. 8).

Tabelle 8: Eingesetzte Versuchsfahrzeuge.

Fahrzeug Typ	Ladewagen		Kipper		Rundballen- presse
	Tandemachse aufgesattelt	Einachser aufgesattelt	Zweiachser angehängt	Zweiachser angehängt	2 Achsstummel aufgesattelt
Fabrikat	Mengela LW 435 G	Pöttinger Ernteprofi II	Mengela MZDK 8000	Unsinn UKA 3 - 121	John Deere 550
Baujahr	1990	1987	1990	1988	1992
Zustand	neu	gebraucht	neu	gebraucht	neu
Federung	ja	nein	ja	ja	nein
Reifengröße	15.0/55-17	19.0/45-17	12.5/80-18	12.0-18 Pil.	31.0 x 13.5-15
Leergewicht	3600 kg	2700 kg	2100 kg	2500 kg	1830 kg
zul. Ges.-gew.	8000 kg	5700 kg	8000 kg	8000 kg	---
Nutzlast	4800 kg	3000 kg	5900 kg	5500 kg	ca. 900 kg
zul. Achslast	4700 kg	6000 kg	4000 kg	5000 kg	---
zul. Deichsell.	1000 kg	1000 kg	---	---	1000 kg
Achsquerschnitt	60 x 60 mm	70 x 70 mm	60 x 60 mm	60 x 60 mm	44 mm Durchmesser
eingesetzte Sensoren	DMS Dehnungsaufn. Druckmeßdose	DMS Dehnungsaufn.	DMS Dehnungsaufn. Druckmeßdose	DMS	DMS
erfaßte Spannungen	Scherspannung Biegespannung Druckkraft	Scherspannung Biegespannung	Scherspannung Biegespannung Druckkraft	Scherspannung	Scherspannung Biegespannung

6.2 Sensorapplikation

Bei der Suche nach geeigneten Sensoren bzw. Sensorsystemen war darauf zu achten, daß die Gewichtskraft als Meßgröße weitgehend ohne Störeinflüsse wie Kraftnebenschlüsse, Dreh- und Biegemomente, Temperaturwechsel oder Wärmestrahlung erfaßt wird. Auch darf die Sicherheit des Fahrzeuges für den Einsatz im öffentlichen Straßenverkehr durch die Sensorapplikation nicht beeinflusst werden.

Erste Versuche zeigten, daß die in der industriellen Wiegetechnik übliche Gewichtsermittlung auf der Basis von einer Dehnungsmeßstreifenapplikation [61] auch für diesen Einsatzzweck gut geeignet ist. Ihre Anwendung im Fahrzeug kann im wesentlichen in drei verschiedenen Applikationsformen erfolgen :

- **Direktapplikation von Dehnungsmeßstreifen:** Aufnahme der Verformung eines Bauteils unter der Gewichtskraft als Biege-, Scher-, Druck- oder Zugspannung.
- **Anwendung fertiger Dehnungsaufnehmer,** die auf die Bauteiloberfläche aufgeschraubt werden und somit zur Aufnahme von Biege- und Druck-/ Zugspannungen geeignet sind.
- **Einsatz von fertig konfektionierten Wägezellen.** Bei der Verwendung von Wägezellen ist allerdings abhängig von der Bauform ein mehr oder weniger großer Aufwand für die exakte Krafteinleitung und einen konstruktiven Überlastschutz zu berücksichtigen. Aufgrund dieser Schwierigkeiten bieten Druckmeßdosen, insbesondere die elastostatische Wägezelle, die besten Einsatzmöglichkeiten.

Aus statischer Sicht ist ein aufgesattelter Anhänger vereinfacht mit einem Kragarmträger auf zwei Stützen [52] zu vergleichen (siehe Abb. 17).

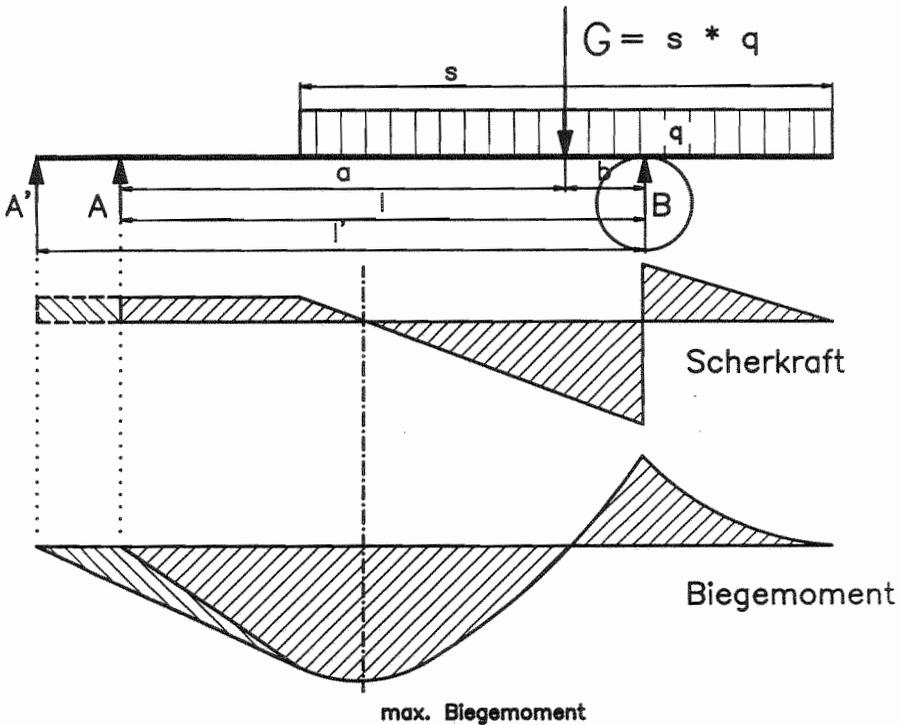


Abbildung 17: Vereinfachte Darstellung eines aufgesattelten Fahrzeuges als Kragarmträger auf zwei Stützen.

Die zu erfassende Gewichtskraft G , die im angenommenen Fall dem Gewicht des geladenen Erntegutes entspricht, ist im statischen Sinn eine Streckenlast, deren Schwerpunkt sich während des Beladens ändern kann. Dieser Fall tritt beim Ladewagen ein, wenn sich beim Laden das Gut durch die Bewegung des Kratzbodens nach hinten verlagert. Ebenso kommt es auch beim Entladen (z.B. beim Stallungstreuer) zu einer weiteren Schwerpunktverlagerung nach hinten. In der Abbildung 17 wird unterstellt, dass keine Entlastung der Deichselstützlast eintritt. Diese Unterstellung hat sich in allen praktischen Versuchen sowohl am Ladewagen wie auch an der Rundballenpresse als richtig erwiesen. Zur Vereinfachung der Darstellung wird davon ausgegangen, daß sich die Achslast (= Stützlast B) nur in einem Auflagerpunkt (Auflager B) abstützt

[6, 9, 13].

Die Gewichtskraft G (berechnet aus der Streckenlast q multipliziert mit der Strecke s) bewirkt in den Auflagern A und B Auflagerkräfte, die sich nach dem Hebelgesetz berechnen lassen [20].

$$(3) \quad A = G \cdot b / l$$

$$(4) \quad B = G \cdot a / l$$

Diese beiden Auflagerkräfte, die der Gewichtskraft entsprechen ($G = A + B$), gilt es zu messen. Die direkte Messung dieser Kräfte über die von ihnen ausgeübte Druckkraft auf die Auflagerpunkte ist durch das Einsetzen von Kraftmeßdosen an den Auflagerpunkten möglich:

- Am Punkt A bietet sich hierfür eine Modifikation der Anhängerkupplung am Schlepper an. An dieser Stelle wäre ein universeller Einsatz möglich und außerdem ein sicherheitstechnischer Aspekt zur Kontrolle der Vorderachsentlastung mit berücksichtigt.
- Am Punkt B (genauer an den beiden Punkten) kann die wirkende Druckkraft durch das Auftrennen der Verbindung zwischen Rahmen und Achse und das Einsetzen einer Wägezelle erfaßt werden.

Aus Abbildung 17 ist ersichtlich, daß durch die Gewichtskraft G auch innere Kräfte in Form von Biege- und Scherkräften hervorgerufen werden. Diese inneren Kräfte bewirken Spannungen innerhalb der belasteten Bauteile, die unter bestimmten Bedingungen der aufgebrachten Last proportional sind:

Biegespannung = Biegemoment / Widerstandsmoment des Bauteils

Scherspannung = Scherkraft / Querschnittsfläche des Bauteils

Diese lastproportionalen Spannungen lassen sich wiederum an der Oberfläche der belasteten Bauteile durch Dehnungsmeßstreifen oder Dehnungsaufnehmer erfassen. Damit läßt sich hier direkt an einigen Bauteilen eine Größe erfassen, die in direkter Abhängigkeit zu der aufgebrachten Last steht.

Aus der genannten Abbildung geht auch hervor, daß sich die Scherkraft nur in Abhängigkeit von der aufgebrachten Last und dem Lastangriffspunkt ändert. Damit ist sie im Gegensatz zum Biege-

moment unabhängig von der Hebelarmlänge l bzw. l' und somit auch unabhängig vom Auflagerpunkt der Deichsel (Punkt A bzw. A') im Anhängemaul des Schleppers. Diese Zusammenhänge führten zu der Überlegung, daß eine Scherspannungsapplikation in der Deichsel für die praktische Meßgenauigkeit wesentlich günstiger ist als eine Applikation zur Erfassung der Biegespannung. Die flache Bauform der üblichen Deichselstücke an ldw. Fahrzeugen gestaltet eine Scherspannungsapplikation allerdings äußerst schwierig und damit wenig erfolgversprechend.

Neben dem Gesamtfahrzeug gilt die weitere Betrachtung der Fahrzeugachse. Die hier angestellten Überlegungen gelten sowohl für aufgesattelte als auch für angehängte Mehrachsfahrzeuge. Die Kräfte und Spannungsverhältnisse sind an der Achse eindeutig zu bestimmen (Abb. 18). Die Achse kann in der vereinfachten Betrachtungsweise als Einfeldträger mit 2 Einzellasten angenommen werden [52].

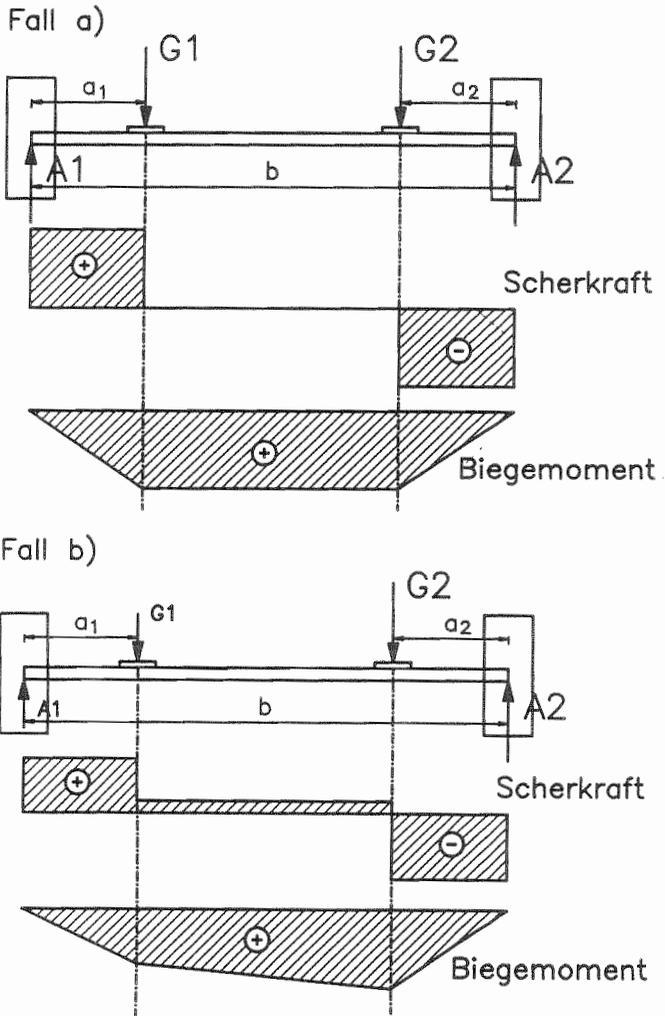


Abbildung 18: Fahrzeugachse als Einfeldträger mit 2 Einzel-lasten.

Im Fall a) wird der wohl am häufigsten anzutreffende Zustand einer weitgehend gleichmäßigen Aufteilung der Gewichtskraft G in die beiden Teilkräfte G_1 und G_2 grafisch dargestellt. Aber auch die extrem ungleichmäßige Verteilung der Last in Fall b) ist praktisch möglich. Daß in beiden Fällen eine lastproportionale Erfassung der

Kräfte möglich ist, soll mit der Abbildung grafisch festgestellt werden.

Die beiden Gewichtskräfte G_1 und G_2 bewirken wiederum Auflagerkräfte A_1 und A_2 , deren Berechnung vereinfacht mit $a = a_1 = a_2$ ebenfalls auf dem Hebelgesetz beruht:

$$(1) \quad A_1 = G_2 \cdot a + G_1 \cdot (b-a) / b$$

$$(2) \quad A_2 = G_1 \cdot a + G_2 \cdot (b-a) / b$$

Im Fall a) gilt : $A_1 = A_2 = G_1 = G_2$

Die Auflagerkräfte, die über die Reifen auf den Boden übertragen werden, lassen sich hier nicht direkt erfassen. Dagegen können die Gewichtskräfte G_1 und G_2 (entspricht der Auflagerkraft B aus Abb. 17) direkt als Druckkräfte mit Hilfe von Druckmeßdosen erfaßt werden.

Die Messung der von den inneren Kräften (Scherkraft und Biegemoment) an der Achse erzeugten Spannungen führt dagegen zu einem wesentlich robusteren Meßsystem. Die von der Scherkraft erzeugte Scherspannung ist direkt lastproportional und läßt sich aus der obengenannten Formel berechnen. Die durch das Biegemoment hervorgerufene Biegespannung ist wiederum nicht nur lastabhängig, sondern auch hebelarmabhängig. Die Hebelarmänderung ist besonders bei breiten Reifen an der Achse wesentlich gravierender als an der Deichsel.

Allerdings muß die Scherspannung in dem Achsabschnitt zwischen dem Rad und der Verbindung zum Rahmen auf beiden Seiten der Achse erfaßt werden. Für eine exakte Sensorapplikation ist dazu eine Mindestlänge dieses Teilstückes von etwa 5 cm erforderlich.

Obwohl es die Spannungsverhältnisse im Fall a) erlauben, die Biegespannung an einer beliebigen Stelle der Strecke b innerhalb der Lastangriffspunkte G_1 und G_2 zu erfassen, muß die Messung durch die Möglichkeit des Eintretens von Fall b) exakt in der Mitte der Achse erfolgen.

Aufgrund dieser aus der grafischen Statik gewonnenen Erkenntnisse

ergaben sich die verschiedenen Möglichkeiten des Sensoreinsatzes an den jeweiligen Fahrzeugen. Die bisher gewonnenen theoretischen Erkenntnisse zeigen, daß drei Sensorsysteme in Frage kommen :

- Direktapplikation von Dehnungsmeßstreifen,
- aufbringen von Dehnungsaufnehmern,
- Einsatz von fertig konfektionierten Wägezellen.

Die Versuchsanstellung sollte nunmehr klären, welches von diesen drei Systemen im praktischen Vergleich beim Einsatz in den jeweiligen Fahrzeugen die besten Möglichkeiten sowohl für die statische als auch für die dynamische Gewichtsermittlung bietet. Da sich mit diesen Systemen die Möglichkeit bietet, die unterschiedlichen am Fahrzeug auftretenden Kräfte und Spannungen zu erfassen, sollte auch geklärt werden, welche Vor- und Nachteile damit verbunden sind.

6.2.1 Sensorapplikation an der Deichsel

Der Sensoreinsatz von allen drei Systemen zur Erfassung der Deichselstützlast wird in der Abbildung 19 aufgezeigt.

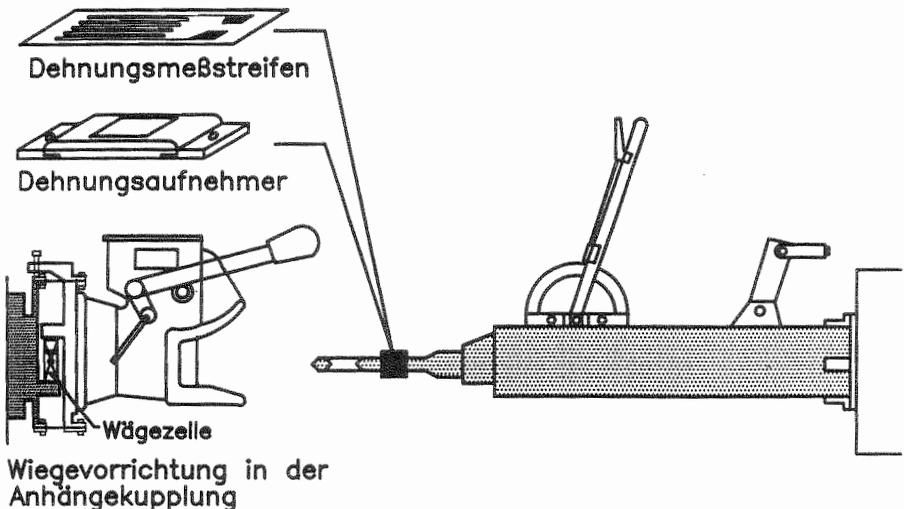


Abbildung 19: Sensoreinsatz zur Gewichtsermittlung an der Fahrzeugdeichsel.

Da sich eine Wägezelle in diesem Fall nur schwerlich in das zu untersuchende Fahrzeug integrieren läßt, wurde der Versuch unternommen, die Druckkraft in der Anhängerkupplung des Schleppers zu erfassen. Diese Meßstelle wurde nach dem Prinzip eines Dreipunktwiegerahmens als Parallelogramm aufgebaut. Das anhängerseitige Zugmaul stützt sich über eine 2 t-Wägezelle auf der schlepperseitigen Anbaukonsole ab. Beide Elemente sind über Federstahlbänder zur Aufnahme der horizontalen Kräfte verbunden.

Die Dehnungsaufnehmer vom Typ Microcell wurden jeweils an der Oberfläche des Deichselstücks aufgeschraubt. Dieses wurde vorher plan gearbeitet, um möglichen Verspannungen des Aufnehmers entgegenzuwirken.

Die Applikation der DMS wurde als Vollbrücke mit jeweils zwei DMS an der Ober- und der Unterseite des Deichselstückes durchgeführt. Mit einem geeigneten Nullpunkt-Abgleichwiderstand wurde die DMS-Vollbrücke in eine ausgeglichene Nullpunktlage gebracht.

Zum Schutz der DMS - Applikation gegen Witterungseinflüsse, Öl und Lösungsmittel wurden 2 Lagen eines speziellen Polyurethanlackes aufgetragen. Als weitere Schutzmaßnahme gegen leichte mechanische Einwirkungen sowie gegen Wasser diente eine bitumenbeschichtete Aluminiumfolie. Der Verzicht auf die Anbringung eines stabilen mechanischen Schutzes gegen massive äußere Einwirkungen beruhte auf der leichteren nachträglichen Zugänglichkeit der Meßstellen.

6.2.2 Sensorapplikation an der Achse

Ebenso wie an der Deichsel fanden auch an der Achse alle drei Sensorsysteme Verwendung (Abb. 20).

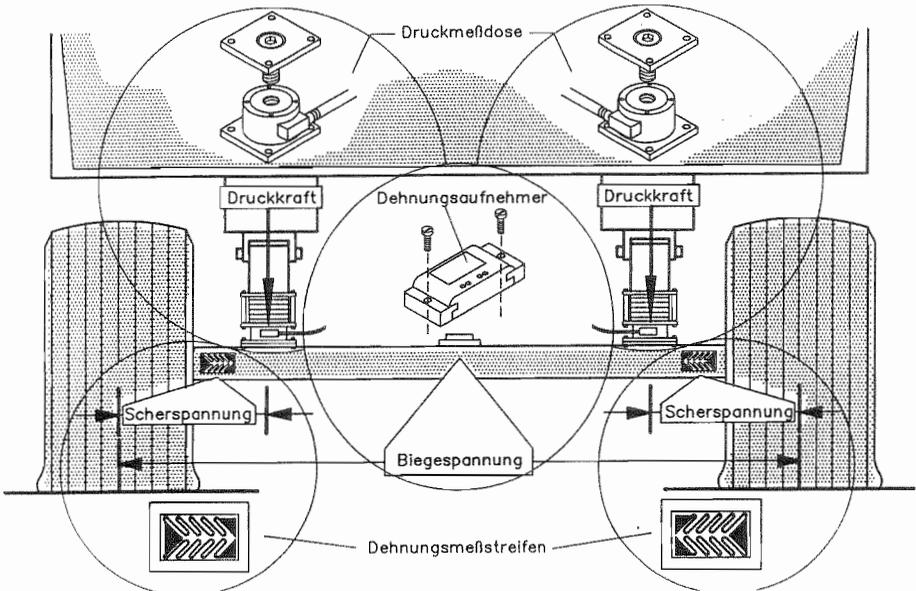


Abbildung 20: Sensoreinsatz zur Gewichtsermittlung an der Fahrzeugachse.

Mit dem Einbau von elastostatischen Druckmeßdosen konnte ein völlig neues und äußerst vielversprechendes Kraftmeßprinzip an den Fahrzeugachsen untersucht werden. Eigens angefertigte Kopf- und Fußplatten, die auf die Wägezellen aufgeschraubt werden, sorgen für die Verbindung von der Achse zu den Wägezellen und von den Wägezellen zum Fahrzeugrahmen. Der Verzicht auf die sonst in der Wägetechnik üblichen bewegten Teile zur Entkoppelung von unerwünschten Seitenkräften und Momenten diente zur Erhöhung der mechanischen Stabilität des Fahrwerkes. Beim Einsatz dieses Sensorsystems muß eine Zunahme der Fahrzeughöhe um die Höhe der Wägezelle inclusive der Anbauplatten in Kauf genommen werden. Im vorliegenden Fall betrug diese 8,5 cm.

An der Fahrzeugachse gelangten 4 verschiedene Dehnungsaufnehmer von z.T. verschiedenen Herstellern zum Einsatz. Diese wurden zur Erfassung der Biegespannung in der Mitte der Fahrzeugachse sowohl an der Ober- als auch an der Unterseite angeschraubt. Die

Sensorapplikation erfolgte hier ebenfalls auf plangearbeiteten Oberflächen.

Die DMS-Direktapplikation diente an der Achse sowohl zur Messung der Biege- als auch der Scherspannung. Die Erfassung der Biegespannung erfolgte mit Hilfe einer DMS-Vollbrücke (je 2 DMS an der Ober- und der Unterseite) in der Achsmittle. Zur Erfassung der Scherspannung mußten zwei DMS-Vollbrücken (je eine an jedem Achsende) aufgeklebt werden. Neben speziellen Doppel-DMS, deren beide Meßgitter unter einem Winkel von 45 Grad zur Mittellinie angeordnet sind, wurden auch 4-fach DMS (mit 4 Meßgittern als Vollbrücke auf einem Träger) eingesetzt. Die Applikation der Doppel-DMS erfolgte im Achsabschnitt zwischen dem Rahmenanschluß und dem Rad an der Vorder- und Rückseite der Achse. Beim 4-fach DMS war dies nur auf einer Seite der Achse erforderlich. Der Nullpunktgleich und der Meßstellenschutz wurde in gleicher Weise wie an der Deichsel durchgeführt.

Die Sensorapplikation an der Rundballenpresse weist im Gegensatz zu den bereits erwähnten Applikationen einige Besonderheiten auf. Hier konnten die ersten an den anderen Fahrzeugen gewonnenen Erkenntnisse bereits umgesetzt werden.

Die eingesetzte Rundballenpresse besitzt keine durchgehende Achse, sondern 2 Achsstummel (Abb. 21). An diesen Bauteilen bietet sich die Möglichkeit einer Verringerung des Querschnittes und damit einer Erhöhung der durch die Querkraft verursachten Scherspannung. Diese Schwächung der Bauteile wurde an den Achsstummeln durch das Ausfräsen von 2 Längsnuten verwirklicht. Dadurch konnte der Querschnitt von 15,2 cm² auf 10 cm² verringert werden. Trotz der Schwächung weist das Bauteil durch die Doppel-T-Form ein relativ hohes Biege-Widerstandsmoment und damit auch eine große Stabilität gegen Verbiegung bei höheren Belastungen auf.

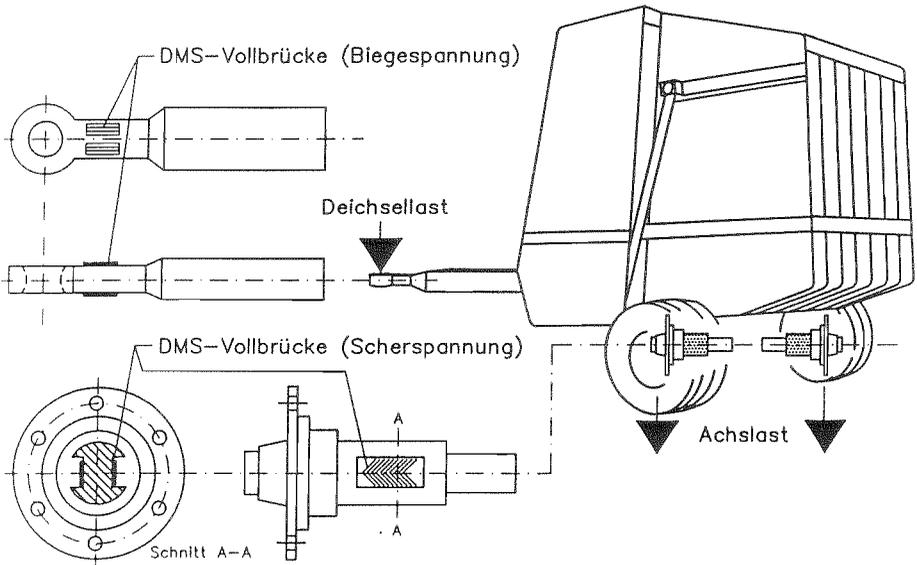


Abbildung 21: DMS-Applikation an der Rundballenpresse.

Die abschließende Tabelle 9 gibt einen Überblick über die eingesetzten Sensoren.

Tabelle 9: Eingesetzte Sensoren zur Gewichtsermittlung.

Sensorart	Typ / Hersteller	Erfassung	Applikation	Meß- bereich	Preis- klasse
Wägezelle	Elastomer · Wz Pfister	Druckkraft	8 Schrauben mit 2 Verbindungsplatten	5 000 kg	1 000 DM
"	2000 DBC Bongshin/Korea	Druck/Zugkraft	2 Schrauben	2 000 kg	700 DM
Dehnungs- aufnehmer	Microcell lang Kistler/Morse	Druck/Zugspannung Biegespannung	2 Schrauben	400 µm	900 DM
"	Microcell kurz Kistler/Morse	Druck/Zugspannung Biegespannung	2 Schrauben	500 µm	1000 DM
"	DS 5 Hottinger/Baldwin	Druck/Zugspannung Biegespannung	3 Schrauben	600 µm	900 DM
"	WLA 1000 SL Data Instruments	Druck/Zugspannung Biegespannung	4 Schrauben	250 µm	800 DM
Einzel- DMS	DK 116 6/350 Hottinger Baldwin	Druck/Zugspannung Biegespannung	Spezialkleber Typ Z 70	2000 µm	20 DM
Doppel- DMS	XK 11K 3/350 Hottinger Baldwin	Scherspannung	Spezialkleber Typ Z 70	2000 µm	35 DM
Vierfach- DMS	FT-2.350-4S TML Strain Gauges	Scherspannung	Spezialkleber Typ Z 70	2000 µm	65 DM

6.3 Signalaufbereitung und Datenerfassung

Die mit Dehnungsmeßstreifen zu messenden Dehnungen sind in der Regel sehr klein. Während bei Wägezellen und Kraftaufnehmern versucht wird, bei Nennlast eine Dehnung von 1000 µm zu erreichen, verringert sich diese bei einer DMS-Direktapplikation an massiven, ungeschwächten Bauteilen (Achse!) auf 1/10 bis 1/20 dieses Wertes. Infolgedessen sind die Widerstandsänderungen in Abhängigkeit vom DMS-Leitermaterial (siehe Punkt 5.1) ebenfalls sehr gering. Dies

wird durch den k-Faktor ausgedrückt. Bei einem k-Faktor von 2 (üblicher Wert bei Metallfolien-DMS) ergibt sich bei einer Dehnung von 1000 μm ein Ausgangssignal von 0,5 mV pro Volt Speisespannung. Diese geringe Ausgangsspannung wird über die bereits erwähnte Wheatstonesche Brückenschaltung mit 4 aktiven DMS auf 2 mV/V erhöht. Bei einer Brückenspeisespannung von 10 Volt beträgt das Ausgangssignal bei Nennlast im günstigen Fall (Wägezelle) 20 mV, im ungünstigen Fall (DMS-Direktapplikation an einem massiven Bauteil) jedoch nur etwa 1 - 2 mV. Über eine in Abbildung 22 gezeigte Meßkette muß dieses Kleinsignal mit einer Verstärkerschaltung auf den hundert- bis tausendfachen Wert erhöht werden [23, 60, 76]. Das daraus resultierende Signal in der Größenordnung von mehreren Volt kann ohne größere Signalanpassung mit einem A/D-Wandler in ein digitales Signal umgewandelt und weiterverarbeitet werden.

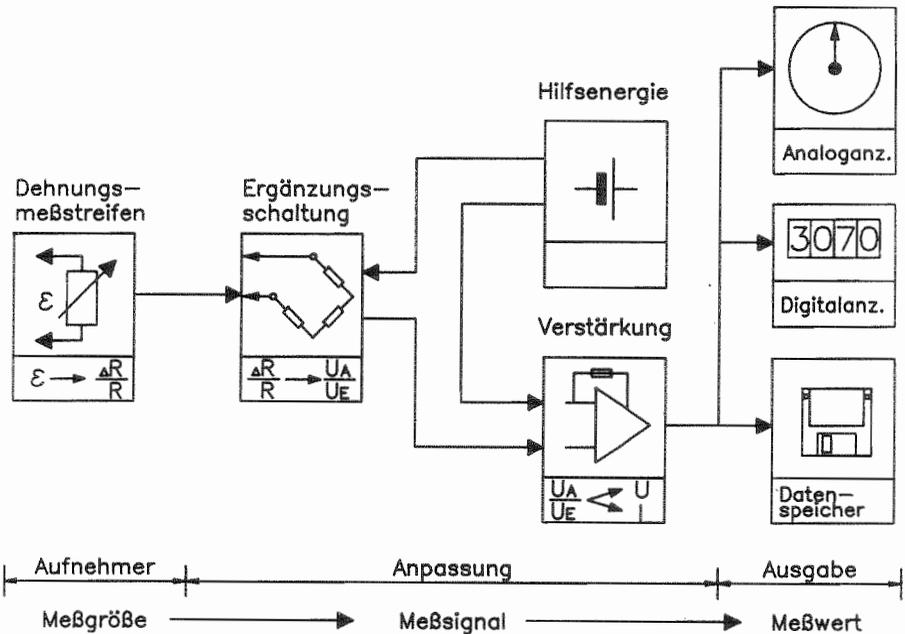


Abbildung 22: Schematischer Aufbau einer Meßkette (nach Hoffmann [25]).

Dieses Großsignal von 1 bis 5 Volt wird mit Hilfe einer Analog-Digital-Wandlung in eine digital darstellbare und weiterverarbeitbare Form überführt. Mit Hilfe von Rechnern können diese Signale gespeichert und anschließend ausgewertet werden.

Nach diesem vereinfacht dargestellten Schema arbeitet auch die in den verschiedenen Versuchen benützte Meßtechnik (Abb. 23).

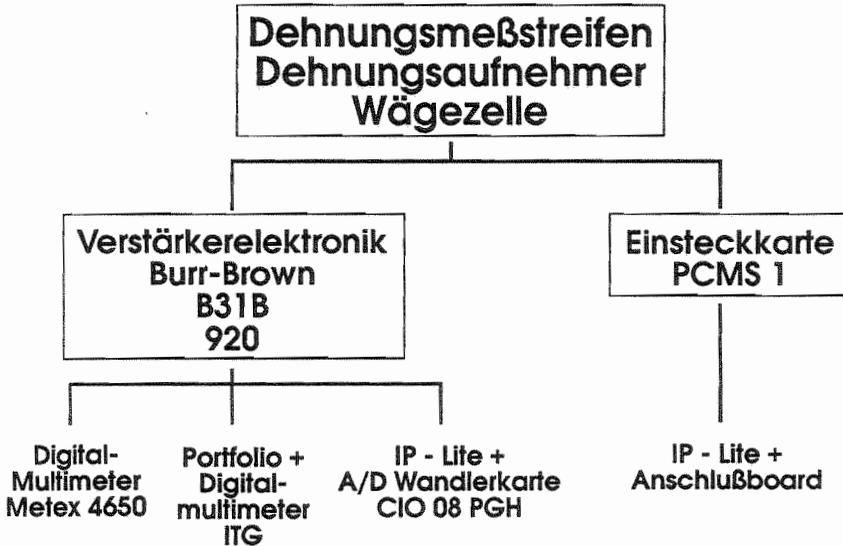


Abbildung 23: Eingesetzte Meßtechnik zur Gewichtsermittlung in ldw. Fahrzeugen.

Die in Abbildung 23 dargestellten Systeme unterscheiden sich in einigen Punkten. Die PC-Einsteckkarte PCMS 1 stellt in Verbindung mit dem Anschlußboard und einem Rechner (IP-Lite) ein komplettes, hochpräzises Signalaufbereitungs- und Datenerfassungssystem dar. Mit dem dazugehörigen Softwarepaket "DATALOG" [77] lassen sich die einzelnen Kanäle getrennt voneinander einstellen (Auflösung, Abfragezyklus, Verstärkung) und kalibrieren. In Verbindung mit dem eingesetzten Robust-PC eignet sich diese Technik sowohl für den statischen als auch für einen dynamischen Einsatz. Aufgrund dieser Voraussetzungen liegt der Einsatzschwerpunkt dieses Systems bei den experimentellen Untersuchungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen bei einer Vielzahl von möglichen Parameteränderungen.

Demgegenüber stehen die Systeme mit einer getrennten Signalkonditionierung und Datenerfassung. Für diese liegt der Einsatzschwerpunkt im praktischen Versuchswesen. Diese Meßanordnungen zielen unter Verwendung von handelsüblichen und damit günstigen DMS-Signalaufbereitungsbausteinen auf die praktische Einsatzfähigkeit und Genauigkeit eines integrierten Systems mit Sensorik und kalibrierter Elektronik. Nur unter diesen Voraussetzungen kann die Möglichkeit einer späteren Umsetzung dieser Untersuchungen in die Praxis getestet werden.

Die technischen Daten der einzelnen Komponenten und deren spezifischer Einsatz sind in Tabelle 10 zusammengefaßt.

Tabelle 10: Übersicht über Art und Verwendung der Meßtechnik.

Typ (Anbieter)	Funktion	Meßsatz Abtastrate	Auflösung Fehler	Anzahl Kanäle	Hilfs- energie
Signalkonditionierung					
B 31 B (Analog Devices)	Sensorspeisung Signalverstärkung	statisch	--- < 0,5 %	1	12 Volt -
Verstärker Board (Burr-Brown)	Sensorspeisung Signalverstärkung	statisch dynamisch	--- < 0,1 %	1	12 Volt -
920 (Rembe)	Sensorspeisung Signalverstärkung	statisch	--- < 0,5 %	2	12 Volt -
PCMS 1 (ASM)	Multimeßkarte Sensorspeisung Signalverstärkung A/D Wandler	statisch dynamisch 10 Hz	10 - 16 bit 0,01 %	16 Analog 8 Digital	220 Volt ~ (PC)
Analog - Digitalwandlung / Anzeige					
Metex 4650 (Conrad)	Digital-Multimeter A/D Wandler Anzeige	statisch	4 1/2 Stellen ± 0,3 %	1	9 Volt - (Batterie)
ITG 2600 (Kontron)	Digital-Multimeter A/D Wandler kalibrierte Anzeige ser. Schnittstelle	dynamisch 10 Hz	4 1/2 Stellen ± 0,01 %	2	12 Volt - 220 Volt ~
CIO 08 PGH (PLUG - IN)	A/D Wandlerkarte Verstärkung	dynamisch 20 kHz	12 bit	8 Analog 6 Digital	220 Volt ~ (PC)
Datenspeicherung					
IP - Lite (Kontron)	Robust PC 386 DX Einsteckkarte Datenspeicherung	statisch dynamisch	--- ---		12 Volt - 220 Volt ~
Portfolio (Atari)	Notebook PC 8088 Datenspeicherung	dynamisch	--- ---		Batterie 12 Volt -

6.4 Wiegeablauf

Die durchgeführten Untersuchungen lassen sich in zwei Blöcke einteilen.

Die statischen Messungen, die an allen Fahrzeugen durchgeführt wurden, dienten zum einen zur Überprüfung der Genauigkeit der Sensorapplikationen an den einzelnen Bauteilen, zum anderen aber auch zum Kalibrieren der kompletten Wiegeeinrichtung für das Gesamtfahrzeug. Damit konnte auch der Gesamtfehler für das jeweilige Fahrzeug festgestellt werden.

Die dynamische Erfassung der Gewichtswerte diente überwiegend der Sammlung von Datenmaterial zur späteren Verarbeitung und Auswertung am Rechner. In verschiedenen Versuchsvarianten konnten diverse Probleme, die sich bei den dynamischen Wiegungen ergaben, untersucht werden.

6.4.1 Statische Gewichtsermittlung

Aufbauend auf Meß- und Prüfverfahren der industriellen Wägetechnik [34; 61] wurde zur statischen Untersuchung der integrierten Wiegetechnik in ldw. Fahrzeugen nach einem speziellen Meßschema verfahren. Unter Verwendung einfacher Mittel konnten auf diese Weise die Linearität, Wiederholbarkeit und Hysterese der einzelnen Wiegesysteme ermittelt und in begrenzter Weise auch der Temperatureinfluß festgestellt werden.

Die Fahrzeuge wurden jeweils in 4 Wiederholungen mit Gewichten in Schritten von 30 bzw. 60 kg von 0 bis 3000 kg belastet und entlastet. Als Gewichte fanden mit Stanzabfällen gefüllte und exakt auf 30 kg (± 5 g) verwogene Plastikbehälter Verwendung. Mehrere spätere Überprüfungen dieser Referenzgewichte ergaben keine Abweichung vom vorgegebenen Soll von ± 5 Gramm. Dies bedeutet bei 3000 kg eine maximale Abweichung des Referenzgewichtes von 500 Gramm bzw. 0,017 %. Die Belastung der Ladeflächen erfolgte jeweils von der Mitte nach außen und von vorne nach hinten. Zur Entlastung wurde genau umgekehrt verfahren. Für die

Belastung der Rundballenpresse bis 900 kg mußte bei geöffneter Ballenkammer eine kleine Plattform in das Fahrzeug eingebaut werden.

Um eine präzise Referenzmessung der unter der aufgebrachten Last wirksamen Deichselstützlast und der Achslasten durchführen zu können, wurden einzelne Radlastwaagen mit einem Lastbereich von jeweils 2000 kg bei einem maximalen Fehler von 0,1 % eingesetzt. Diese Technik ermöglichte die genaue Zuordnung der wirksamen Gewichtskräfte zu den einzelnen sensorbestückten Bauteilen (Achsen, bzw. Deichsel) und damit eine Gesamtkalibrierung des Fahrzeugs und somit auch eine kontinuierliche Datenaufzeichnung.

Zur Überprüfung der modifizierten Anhängerkupplung konnte dieses Verfahren nicht eingesetzt werden. In diesem Fall wurde die Anhängerkupplung mit Hilfe eines Hebezuges in Teilschritten be- und entlastet. Eine dazwischengehängte 2000 kg- bzw. 1000 kg-Wägezelle (max. Fehler 0,1 %) diente als Referenz für die erfaßten Gewichtswerte.

6.4.2 Dynamische Gewichtsermittlung

Im Gegensatz zu den statischen Messungen konnte bei den dynamischen Untersuchungen keine Referenzmessung durchgeführt werden. Als Ergebnis dieser Untersuchungen interessierte jedoch weniger die absolute Gewichtsgröße und deren Fehler, sondern vielmehr die relative Gewichtsänderung in Abhängigkeit von der Zeit bzw. der Wegstrecke. Bei der Durchführung dieser Versuche wurden die Versuchsfahrzeuge zum einen mit einer konstanten Last über verschiedene Böden bewegt. Zum anderen wurde die dynamische Gewichtsermittlung aber auch während des Ladens oder des Pressens durchgeführt, weil dieser Fall für die spätere lokale Ertragsermittlung von entscheidender Bedeutung ist. Durch die Wahl der Fahrzeuge und der Einstellung bestimmter Versuchsparameter konnte deren Einfluß auf die dynamische Gewichtsermittlung ermittelt werden. Folgende Parameter wurden untersucht:

- Pickup am Boden - Pickup angehoben,
- Maschine eingeschaltet - Maschine ausgeschaltet,
- Last.

Da insbesondere während des Ladens erhebliche Beschleunigungskräfte auf das gesamte Fahrzeug wirken, war es naheliegend, mit Hilfe eines Beschleunigungssensors die auftretende Vertikalbeschleunigung mit zu erfassen. Diesem Zweck diente ein handelsüblicher Beschleunigungssensor (Modell 3145-002 von ICSensors) mit integrierter Verstärkerelektronik, der eine Beschleunigung von $\pm 2 \text{ g}$ erfassen kann. Der Sensor wurde an verschiedenen Fahrzeugen und jeweils unterschiedlichen Bauteilen angebracht (siehe besondere Hinweise im Kapitel 7).

6.5 Fehlerbetrachtung

Für die vorliegende Aufgabenstellung genügt der bei DMS-Aufnehmern und Waagen übliche Bezug des Meßfehlers zum Meßbereichsendwert nicht. Zum einen ist der Meßbereichsendwert, der bei Waagen durch die Wiegekapazität der Wägezellen bestimmt ist, nicht exakt zu definieren und zum anderen steht für diesen Einsatzzweck die summierende Erfassung von relativ kleinen Teilmengen im Vordergrund, deren Abweichung gemessen vom Endwert einen unzumutbar hohen Fehler annehmen könnte.

Die Genauigkeit eines überwiegend im Teillastbereich arbeitenden Wägesystems läßt sich dagegen wesentlich exakter durch die absolute bzw. relative Abweichung vom Istwert darstellen.

Für die Genauigkeitsmerkmale von Kraftaufnehmern bestehen keine allgemeingültigen Normen oder allgemeinverbindliche Klassierungsformeln. In der industriellen Wägetechnik werden die Definitionen aus der Richtlinie VDI/VDE 2637 "Wägezellen, Kenngrößen" [11; 34; 53; 61; 68] verwendet. Diese bezieht sich allerdings nur auf Wägezellen.

Für eine Fehlerbetrachtung bei Kraftaufnehmern sind drei Kategorien von Interesse:

- Mängel in der Umformungscharakteristik selbst,
- Temperaturabhängigkeiten und
- Umgebungseinflüsse allgemeiner Natur.

Die Mängel in der Umformungscharakteristik betreffen insbesondere die Reproduzierbarkeit, die Linearität und das Hystereseverhalten sowie den zeitlichen Kriechfehler des Aufnehmers.

Viele Sensoren werden mittlerweile mit einer Temperaturkompensation ausgestattet. Trotzdem können sich Temperaturschwankungen als erhebliche Fehlerquellen erweisen.

Dagegen spielen die Umgebungseinflüsse allgemeiner Natur (z.B. Strahlung) in der Landwirtschaft eine vernachlässigbar kleine Rolle.

Diese drei Kategorien sind nicht nur für die Aufnehmer, sondern in gleichem Maße auch für gesamte Wägesysteme mit mehreren Aufnehmern zutreffend. Zusätzlich sind hier auch die Einflüsse der Krafteinleitung zu berücksichtigen.

Allerdings bedarf die Frage nach der zu fordernden Genauigkeit bei den einzelnen Ernte- bzw. Transportfahrzeugen einer differenzierten Betrachtung. Aus der Tabelle 11 wird die Problematik bei diesen Fahrzeugen ersichtlich.

Tabelle 11: Relativer Bezug des Wiegefehlers zu Maschinengewichten und Erntemengen.

		Ladewagen	Erntewagen	Kipper	Rundballenpresse
Erntegut		Grüngut / Heu	Anwekksilage	Maissilage	Heu / Anwekksilage
Leergewicht (kg)		3600	2700	2500	1800
Nutzlast (kg)		4800 / 2000	3000	5500	300 / 700
Anteil Nutzlast an Gesamtgewicht (%)		57 / 36	53	68	14 / 28
abs. Abweichung (kg) bei 1% Meßfehler		84 / 56	57	80	21 / 25
rel. Abweichung zu Nutzlast (%) bei 1% Meßfehler		1,75 / 2,8	1,9	1,45	7,0 / 3,57
Arbeitsbreite (m)		2,7 / 5,0	5,0	3,0 (4-rhg.)	5,0 / 5,0
Ernteertrag/Schnitt (dt/ha)		150 / 50	100	600	50 / 100
Anzahl Schnitte		4 / 3	4	1	3 / 4
Masseaufnahme	kg/m	4 / 2,5	5	18	2,5 / 5
	kg/24m	96 / 60	120	432	60 / 120
Wegstrecke (m) bei 1% Meßfehler		21 / 22,4	11,4	4,4	8,4 / 5
Messungen für 1 ha (Anzahl)	je Schnitt	74 / 40	40	67	40 / 40
	je Jahr	296 / 120	160	67	120 / 160

Zunächst ist festzustellen, daß der Anteil der Nutzlast am Gesamtgewicht im Höchstfall 68 %, in der Regel allerdings wesentlich weniger und im Extremfall nur 14 % beträgt. Bedingt durch die hohe Nennlast eines integrierten Wägesystems ist damit in allen Fällen der nutzbare Wägebereich relativ gering. Ein Meßfehler von 1 % bezogen auf die Nennlast (Leergewicht + Nutzlast) führt zu einer absoluten Abweichung von 21 bis 84 kg. In bezug auf die Nutzlast bedeutet dies bereits einen relativen Fehler von 1,45 bis 7 %.

Eine Fehlerangabe nach dieser Berechnungsmethode ist für die vorliegende Aufgabenstellung wenig aussagekräftig.

Bei relevanten Erntemengen von 50 - 600 dt (Frischmasse) pro Hektar und Schnitt ergeben sich in Abhängigkeit von der Arbeitsbreite Masseaufnahmen von 2,5 bis 18 kg je Meter. Bei der Teilschlagbetrachtung ist nach SCHUELLER [59] eine Wegstrecke von 36 m als Rastermaß zu fordern. AUERNHAMMER [3] geht bei seinen Überlegungen noch weiter und hält zukünftig ein Rastermaß von 24 * 24 m für erforderlich. Daraus resultieren bei einer Arbeitsbreite Teilerträge zwischen 60 und 432 kg. Diese Teilerträge gilt es mit der größtmöglichen Genauigkeit zu erfassen.

Für die Darstellung der Genauigkeit wurden in der vorliegenden Arbeit die absolute und die relative Abweichung von der aufgebrachten Last, also vom Istwert, verwendet. Da in diesem Fall nicht die einzelne Abweichung sondern bei 70 bis 300 Messungen je Hektar und Jahr die durchschnittliche Abweichung interessiert, wird als statistische Kenngröße wie bei technischen Anwendungen [1; 2; 9; 17; 55] üblich der 95 %-Vertrauensbereich herangezogen.

Noch immer wird die Frage nach der benötigten Genauigkeit der Ertragsdaten als Datengrundlage für lokale, rechnergestützte Pflanzenbausysteme heftig diskutiert. Das Ergebnis dieser Arbeit soll deshalb auch aufzeigen, ob und mit welcher Genauigkeit sich mit Hilfe der Gewichtsermittlung Erträge insbesondere im Grünland lokal feststellen lassen.

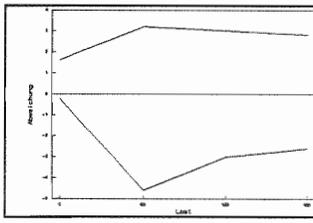
6.6 Datenauswertung

Die Auswertung der erfaßten Daten aus den statischen Versuchen wurden nach einem einheitlichen Schema mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes LOTUS 123 am PC durchgeführt. Die Berechnung des 95 %-Vertrauensbereiches (VB-95%) [56] erfolgte in sieben Schritten (Tab. 12):

Tabelle 12: Schema der Datenauswertung.

Rechenschritt	Beispiel																																	
<p>1.) Berechnen der Regression zwischen Rohsignal- und Referenzwerten</p> <p>Berechnen der Regression zwischen den Referenzwerten und den erfaßten Rohsignalwerten (verstärktes Brückenausgangssignal in mV). Diese Berechnung erfolgt für Achsen und Deichsel getrennt, da diese Bauteile in Abhängigkeit der auf sie wirkenden Gewichtskräfte unterschiedliche Dehnungen erbringen. Das ermittelte Bestimmtheitsmaß gibt eine erste Aussage über die Güte der Messung.</p>	<p>Last Meßwert (kg) (mV)</p> <table border="1"> <tr><td>0</td><td>2,167</td></tr> <tr><td>60</td><td>2,260</td></tr> <tr><td>120</td><td>2,363</td></tr> <tr><td>180</td><td>2,464</td></tr> <tr><td>180</td><td>2,473</td></tr> <tr><td>120</td><td>2,373</td></tr> <tr><td>60</td><td>2,273</td></tr> <tr><td>0</td><td>2,170</td></tr> </table>	0	2,167	60	2,260	120	2,363	180	2,464	180	2,473	120	2,373	60	2,273	0	2,170	<p>Regression:</p> <p>Anzahl Werte : 8 Bestimmtheitsmaß : 99 % Konstante : -1296 x-Koeffizient : 598</p>																
0	2,167																																	
60	2,260																																	
120	2,363																																	
180	2,464																																	
180	2,473																																	
120	2,373																																	
60	2,273																																	
0	2,170																																	
<p>2.) Kalibrierfunktion bestimmen</p> <p>Aus dem y-Achsenabschnitt (=Offset) und der Steigung (=Gain) der Regressionsrechnung lassen sich die Kalibrierfunktionen für die zu untersuchenden Meßeinheiten (Achse, Deichsel oder Anhängerkupplung) berechnen. Die somit darstellbare Regressionsgerade ($y = \text{Gain} \cdot x + \text{Offset}$) entspricht der optimalen Kalibrierung.</p>	<p>Gain (x-Faktor) = 598 Offset (Konstante) = -1296</p> <p>Anzeige = $598 \cdot \text{Wert} + (-1296)$</p>																																	
<p>3.) Gewichtswerte mit Kalibrierfunktion berechnen</p> <p>Die Rohsignalwerte werden mit Hilfe der Kalibrierfunktion in gewichtsproportionale Werte umgerechnet.</p>	<p>Last Anzeige (kg) (kg)</p> <table border="1"> <tr><td>0</td><td>-0,2</td></tr> <tr><td>60</td><td>55,4</td></tr> <tr><td>120</td><td>117,0</td></tr> <tr><td>180</td><td>177,4</td></tr> <tr><td>180</td><td>182,8</td></tr> <tr><td>120</td><td>123,0</td></tr> <tr><td>60</td><td>63,0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1,6</td></tr> </table>	0	-0,2	60	55,4	120	117,0	180	177,4	180	182,8	120	123,0	60	63,0	0	1,6																	
0	-0,2																																	
60	55,4																																	
120	117,0																																	
180	177,4																																	
180	182,8																																	
120	123,0																																	
60	63,0																																	
0	1,6																																	
<p>4.) Einzelabweichungen berechnen</p> <p>Die Differenz aus diesen gewichtsproportionalen Werten und der Regressionsgerade ergibt den absoluten Fehler für die jeweiligen Meßwerte. Der relative Fehler bezogen auf den Istwert berechnet sich aus dem Verhältnis dieses absoluten Fehlers zum Referenzwert.</p>	<p>Last · Anzeige = Einzelabweichung (kg) (kg) (kg)</p> <table border="1"> <tr><td>0</td><td>-0,2</td><td>=</td><td>-0,2</td></tr> <tr><td>60</td><td>55,4</td><td>=</td><td>-4,6</td></tr> <tr><td>120</td><td>117,0</td><td>=</td><td>-3,0</td></tr> <tr><td>180</td><td>177,4</td><td>=</td><td>-2,6</td></tr> <tr><td>180</td><td>182,8</td><td>=</td><td>+2,8</td></tr> <tr><td>120</td><td>123,0</td><td>=</td><td>+3,0</td></tr> <tr><td>60</td><td>63,0</td><td>=</td><td>+3,0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1,6</td><td>=</td><td>+1,6</td></tr> </table>		0	-0,2	=	-0,2	60	55,4	=	-4,6	120	117,0	=	-3,0	180	177,4	=	-2,6	180	182,8	=	+2,8	120	123,0	=	+3,0	60	63,0	=	+3,0	0	1,6	=	+1,6
0	-0,2	=	-0,2																															
60	55,4	=	-4,6																															
120	117,0	=	-3,0																															
180	177,4	=	-2,6																															
180	182,8	=	+2,8																															
120	123,0	=	+3,0																															
60	63,0	=	+3,0																															
0	1,6	=	+1,6																															
<p>5.) Standardabweichung berechnen</p> <p>Durch die Berechnung der Standardabweichung über alle Wiederholungen eines Lastwertes läßt sich der 95 %- Vertrauensbereich bei jedem Lastwert bestimmen.</p>	<p>Last Abweichung bei 4 Wiederholungen</p> <table border="1"> <tr><td>60</td><td>-4,6</td><td>3,0</td><td>-3,8</td><td>4,0</td><td>-0,2</td><td>1,0</td><td>-2,2</td><td>1,0</td></tr> </table> <p>Last Standardabweichung</p> <table border="1"> <tr><td>60</td><td>3,8</td></tr> </table> <p>Last 95 %-Vertrauensbereich</p> <table border="1"> <tr><td>60</td><td>$1,96 \cdot 3,8 = 7,44$</td></tr> </table>		60	-4,6	3,0	-3,8	4,0	-0,2	1,0	-2,2	1,0	60	3,8	60	$1,96 \cdot 3,8 = 7,44$																			
60	-4,6	3,0	-3,8	4,0	-0,2	1,0	-2,2	1,0																										
60	3,8																																	
60	$1,96 \cdot 3,8 = 7,44$																																	

Fortsetzung von Tabelle 12

<p>6.) 95 %-Vertrauensbereich bestimmen Der Gesamtfehler für das betrachtete Fahrzeug ergibt sich über die Berechnung der Standardabweichung und des 95 %-Vertrauensbereiches über alle absoluten und relativen Abweichungen.</p>	<p>Absolutwerte: Standardabweichung = 2,87 95 %-Vertrauensbereich = $1,96 \cdot 2,87 = 5,63$</p>
<p>7.) Grafische Darstellung Neben dem Gesamtfehler, der als Aussage für die Genauigkeit der Wiegetechnik im Fahrzeug gilt, ist auch dessen Zusammensetzung von Interesse. Aus der grafischen Darstellung des absoluten Fehlers bei Be- und Entlastung über den gesamten Meßbereich mit den einzelnen Wiederholungen lassen sich der Linearitäts-, Hysterese- und Wiederholbarkeitsfehler für die jeweilige Applikation ablesen.</p>	

Die dynamischen Meßwerte wurden ebenfalls mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogrammes Lotus 1-2-3 [80] und der Datenanalysesoftware DIA [79] bzw. Signal*Math [82] unter Verwendung diverser Formeln und Berechnungsalgorithmen aufbereitet. Weil diese Berechnungen einen Teil des Ergebnisses darstellen, werden sie unter Punkt 7.2 weiter erläutert.

7. Versuchsergebnisse

Die Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt getrennt nach statischen und dynamischen Messungen.

7.1 Statische Messungen

7.1.1 Biegespannung an Achse und Deichsel

Bei den Vorversuchen zur Erfassung der Biegespannung wurden zunächst fertige Dehnungsaufnehmer und später direkte Dehnungsmeßstreifenapplikationen an der Achse und der Deichsel eingesetzt.

An der Achse zeigte sich bei beiden Systemen bei der Belastung des Fahrzeugs bis 3000 kg nur ein geringer Linearitätsfehler (Abb. 24).

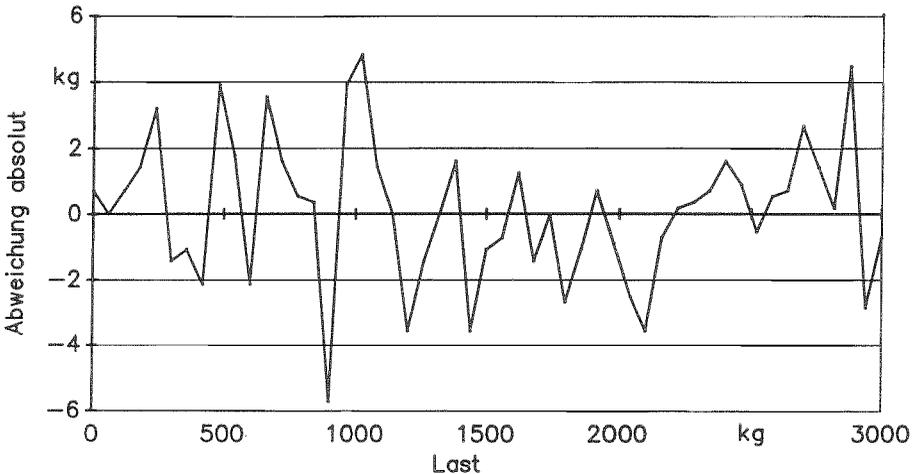


Abbildung 24: Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung mit WLA 1000 (Biegespannung) auf der Achse (1 Beladevorgang).

Während die verschiedenen Dehnungsaufnehmer einen absoluten Fehler von ± 6 kg bis ± 10 kg (Versuche an weiteren Achsen) erbrachten, lag die DMS-Applikation mit ± 15 kg nur geringfügig schlechter. Allerdings ergab sich für den Ladewagen ebenso wie für den Kipper

an den Achsen bei mehreren Be- und Entladungszyklen (Abb. 25) eine große Hysterese von annähernd 100 kg (Abb. 26).

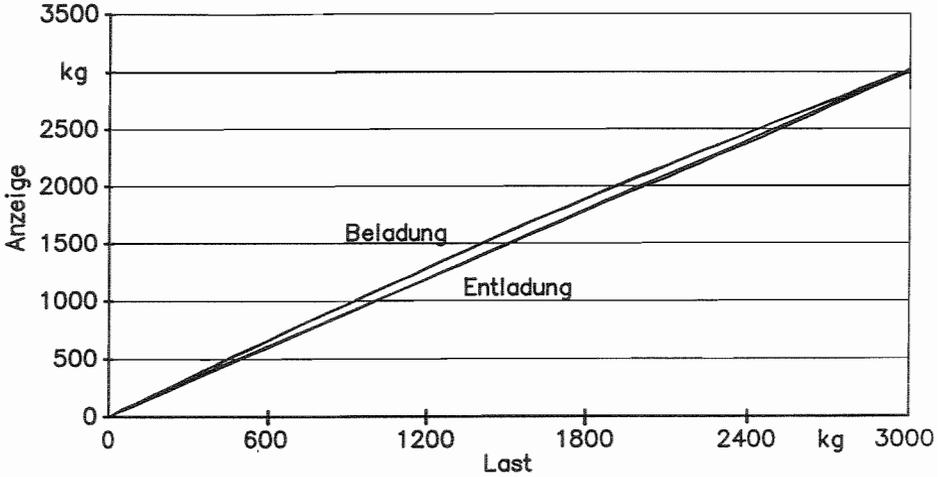


Abbildung 25: Gewichtsermittlung am Einachsladewagen mit Microcell auf Achse und Deichsel (2 Be-/Entladungszyklen).

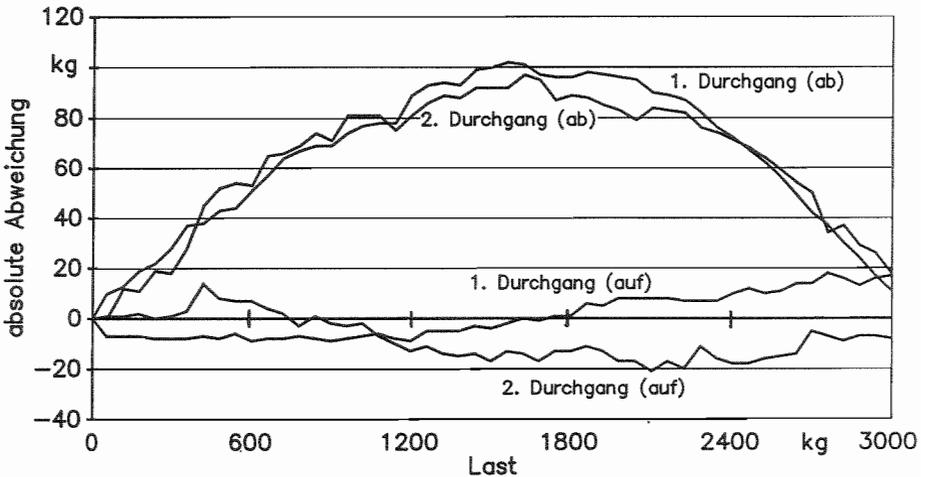


Abbildung 26: Absolute Abweichung bei 2 Durchgängen am Ladewagen mit Microcell auf Achse (Biegespannung) und Deichsel.

Diese große Umkehrspanne ist theoretisch darauf zurückzuführen, daß sich der Hebelarm (Radaufstandspunkt - Rahmenanschluß) unter Last ändert und damit die erfaßte Biegespannung systematisch beeinflußt wird.

Bei der einseitigen Applikation der Dehnungsaufnehmer ergab sich sowohl an der Deichsel wie auch an der Achse ein weiterer erheblicher Nachteil in der starken Temperaturdrift. Trotz einer weitgehenden Temperaturkompensation für Stahl (Herstellerangaben) ergaben sich bei Temperaturänderungen von 15 Kelvin Offsetveränderungen von ca. 200 kg. Die DMS-Applikation selbst ist durch die Vollbrückenordnung weitgehend temperaturkompensiert. Vergleichend werden nachfolgend sämtliche Ergebnisse zur Biegespannung an der Achse zusammengestellt (Tab. 13).

Tabelle 13: Gewichtsermittlung über Biegespannung an der Achse.

Fahrzeug	Aufnehmer	Last / Achszahl	Fehler absolut	Fehler relativ	Temperatur-einfluß
Mengele LW 435 Tandemachsladewagen	Microcell	3000 kg 2	± 57 kg	± 5,1 %	groß
	Hottinger DS 5	3000 kg 2	± 54 kg	± 5 %	groß
Pöttinger EP II Einachsladewagen	Microcell	3000 kg 1	± 66 kg	± 6,3 %	groß
	WLA 1000	3000 kg 1	± 58 kg	± 5,5 %	groß
	DMS Vollbrücke	3000 kg 1	± 62 kg	± 5,6 %	gering
Mengele MZDK 8000 Zweiachskipper	Microcell	3000 kg 2	± 120 kg	± 15 %	groß

Wesentlich genauer waren dagegen die Meßergebnisse mit dieser Anordnung an der Deichsel (Abb. 27).

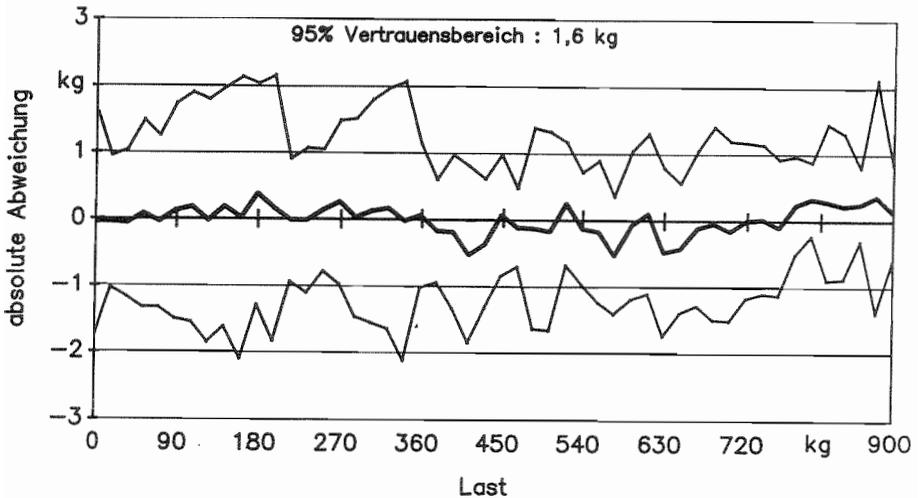


Abbildung 27: Gewichtsermittlung mit DMS (Biegespannung) an der Deichsel (4 Durchgänge; Mengele LW 435).

In dieser und in den folgenden Abbildungen wird der Mittelwert und der 95 %-Vertrauensbereich bei 4 Durchgängen dargestellt.

In Abhängigkeit vom Fahrzeug ergab sich bei einer Belastung der Deichsel bis 900 kg beim Tandemachsladewagen ein absoluter Fehler (95 %-Vertrauensbereich) von 1,6 kg. Dieses Ergebnis konnte sowohl am Einachsladewagen wie auch an der Rundballenpresse bestätigt werden (Tab. 14).

Tabelle 14: Gewichtsermittlung über Biegespannung an der Deichsel.

Fahrzeug	Aufnehmer	Last	Fehler absolut	Fehler relativ	Temperatur-einfluß
Mengele LW 435	Microcell	900 kg	2,2	0,7	groß
	DMS	900 kg	1,6	0,5	gering
Pöttinger EP II	Microcell	600 kg	1,8	1,0	groß
	DMS	600 kg	1,6	0,8	gering
John Deere 550	DMS	400 kg	1,1	0,5	gering

7.1.2 Scherspannung an der Achse

Die theoretischen Untersuchungen führten zu dem Ergebnis, daß durch eine Scherspannungsmessung die vorgenannten Probleme mit der hebelarmbedingten Hysterese zu lösen seien. Diese Applikation konnte nur mit Dehnungsmeßstreifen durchgeführt werden, weil zum einen der verfügbare Platz sehr klein ist und zum anderen keine fertig konfektionierten Dehnungsaufnehmer für 2 Wirkungsrichtungen existieren.

Für diese Untersuchungen wurde zunächst der Tandemachsladewagen Mengele LW 435 mit einer Applikation auf beiden Achsen (Scherspannung) und an der Deichsel (Biegespannung) herangezogen. Mit dieser Anordnung wird der Umkehrfehler minimiert. Der Gesamtfehler für das Fahrzeug liegt mit absolut ± 37 kg (95 %-VB bei 4 Durchgängen) allerdings relativ hoch (Abb. 28). Dies entspricht einer relativen Abweichung von 4,4 %.

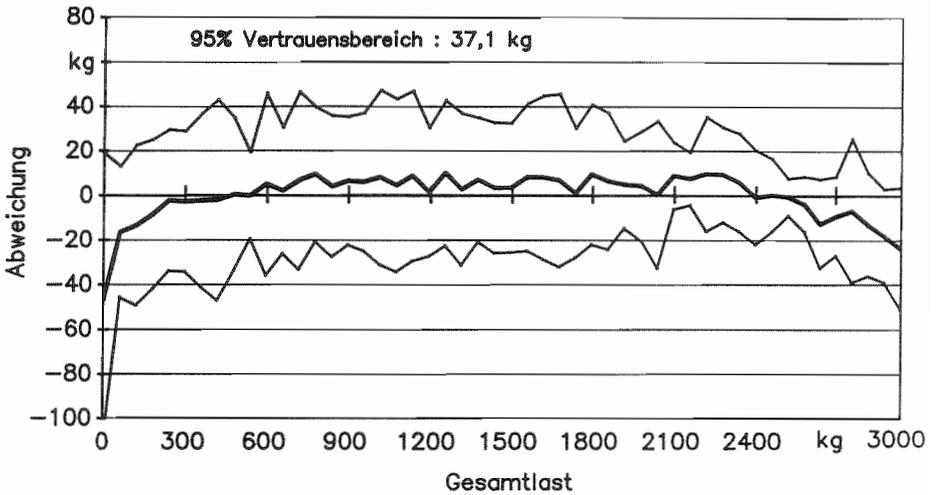


Abbildung 28: Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung am Mengele LW 435 mit DMS auf Achsen (Scherspannung) und Deichsel.

Dieser hohe Meßfehler resultiert aus den Achsen, da die Biegespannungsapplikation an der Deichsel lediglich einen Fehler von 1,6 kg aufwies. Bei der getrennten Untersuchung der beiden Achsen ergab sich wie in Abb. 29 und 30 dargestellt ein relativ großer Unterschied.

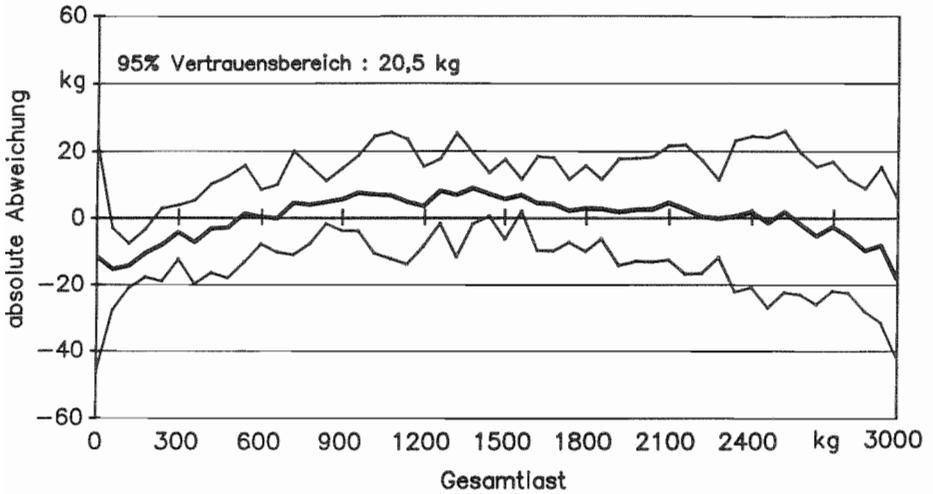


Abbildung 29: Absoluter Fehler am LW 435 mit DMS auf der 1. Achse.

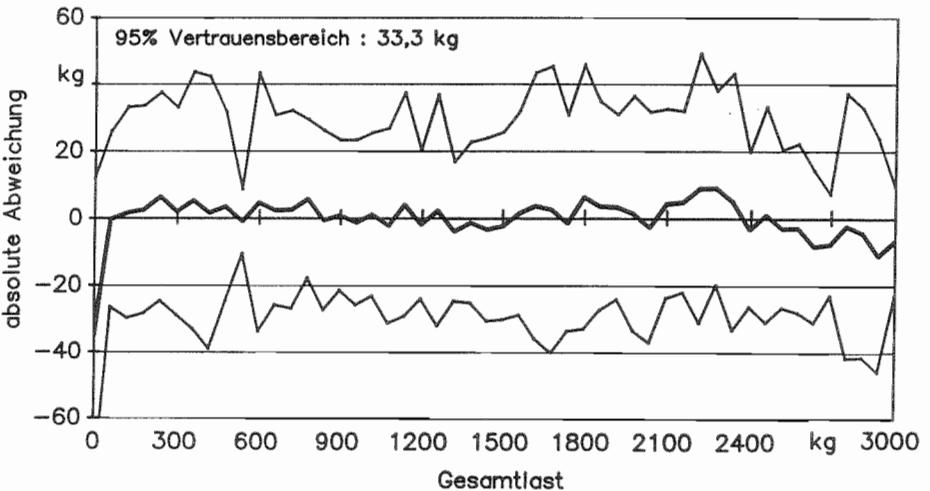


Abbildung 30: Absoluter Fehler am LW 435 mit DMS auf der 2. Achse.

Daraus ist zu sehen, daß die DMS-Applikation auf der 1. Achse qualitativ hochwertiger war als jene auf der 2. Achse. Eine

Erklärung für den relativ großen Fehler läßt sich nach Berechnung der auftretenden Dehnungen bei der zu messenden Scherspannung finden. Bedingt durch den großen Querschnitt der Achsen im Verhältnis zu der geringen Last (Gesamtlast abzüglich Deichsellast geteilt durch Vier) ergibt sich rechnerisch für jedes Meßgitter der DMS eine Dehnung von ca. 15 μm . Wie bereits früher erwähnt liegt das Optimum (im Falle einer Wägezelle verwirklicht) bei 1000 μm . Damit bestehen theoretisch mehrere Möglichkeiten der Verbesserung der Empfindlichkeit:

- 1.) Verwendung von Halbleiter - Dehnungsmeßstreifen
- 2.) Verringerung des Querschnittes an der Meßstelle

Gegen Punkt 1 spricht der höhere Preis von Halbleiter-Materialien und die wesentlich schwierigere Applikation. Insbesondere gilt dies für die Erfassung von Scherspannungen, weil speziell für diese Aufgabe keine angepaßten Meßgitterformen verfügbar sind. Dagegen läßt sich Punkt 2 relativ einfach bewerkstelligen. Den einfachsten Fall stellt die Reduzierung der Achszahl auf eine Achse dar. Daß diese Überlegungen richtig sind beweist das Ergebnis in Abbildung 31 am Einachsladewagen Pöttinger Ernteprofi II.

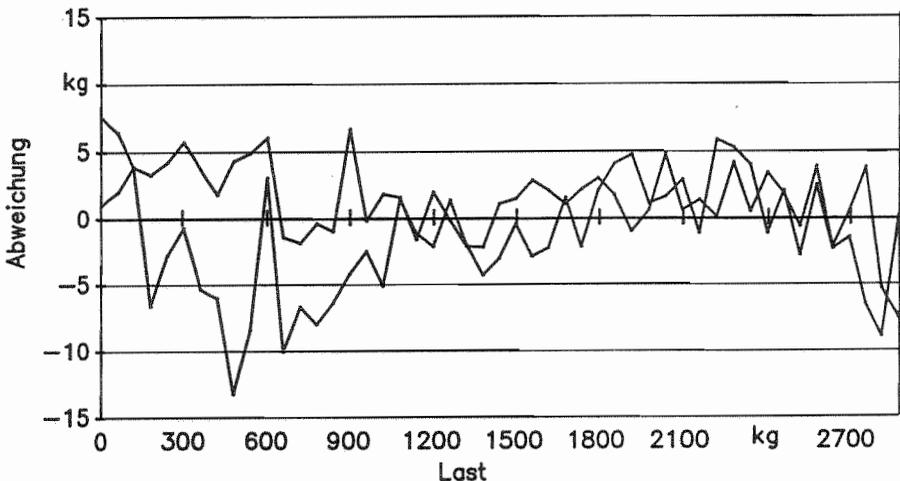


Abbildung 31: Absoluter Fehler am Pöttinger EP II mit DMS auf der Achse und der Deichsel (1 Wiegezyklus).

Dabei bewegt sich der absolute Fehler für das gesamte Fahrzeug bei einer Last bis 3 t bei einem vollständigen Be- und Entlastungszyklus innerhalb ± 10 kg.

Noch optimalere Bedingungen lassen sich durch eine weitere Verringerung des Querschnittes, wie dies bei der untersuchten Rundballenpresse erfolgte, schaffen. In diesem Fall ergibt die Berechnung bei der Nennlast eine Dehnung von ca. $40 \mu\text{m}$ und liegt damit dreimal so hoch wie beim Tandemachsladewagen. Daß diese Voraussetzungen zu einem noch besseren Ergebnis führen, zeigt der Gesamtfehler von 1,8 kg (95 %-VB bei 4 Durchgängen) absolut (Abb. 32) bzw. 0,5 % relativ (Abb. 33).

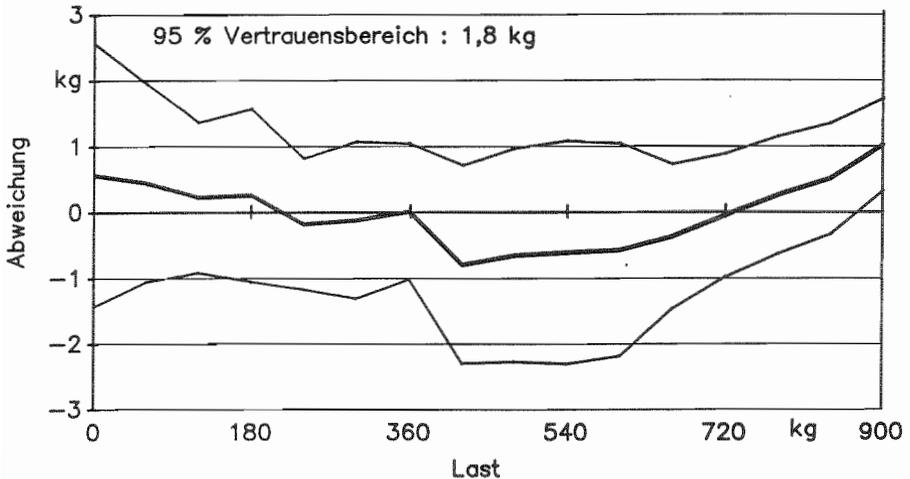


Abbildung 32: Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse mit DMS auf Achse und Deichsel.

Bei diesem Ergebnis ist zudem zu berücksichtigen, daß es sich um praxisrelevante Messungen handelt. Dies bedeutet, daß die einzelnen Meßwerte unter Verwendung einer einfachen Elektronik (Burr-Brown Sensorboard) nach einer vorherigen Kalibrierung des gesamten Systems ohne nachfolgende Regressionsberechnung gewonnen wurden.

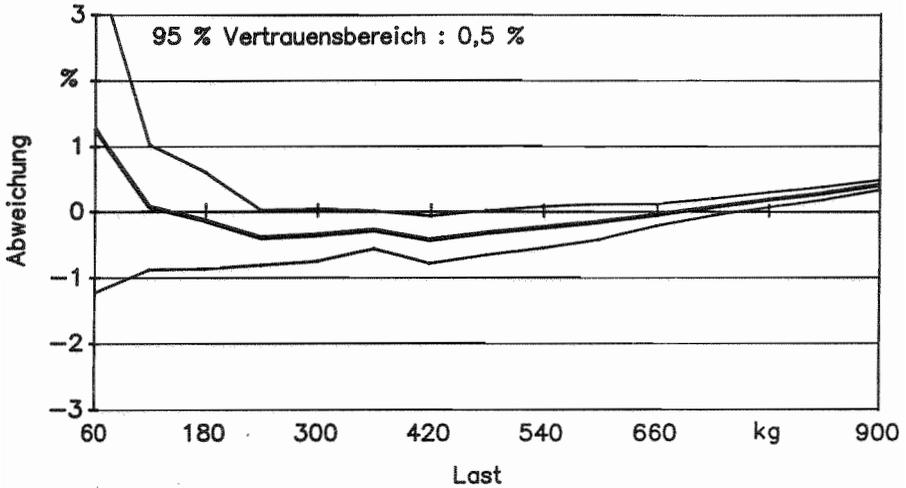


Abbildung 33: Relativer Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse mit DMS auf Achse und Deichsel.

Wie aus der abschließenden Übersicht (Tab. 15) zu ersehen ist, hängt die Güte des Meßergebnisses stark vom Querschnitt der Achse und dem Achsabstand zwischen Rad und Rahmen ab. Die Messungen am Mengele Kipper MZDK 8000 erbrachten aufgrund seines geringen Achsabstandes von nur 1,5 cm keine brauchbaren Meßergebnisse.

Tabelle 15: Meßergebnisse bei der Gewichtsermittlung mit DMS über Scherspannung an der Achse.

Fahrzeug	Last / Achszahl	Achsquerschnitt	Abstand Reifen - Rahmen	Fehler absolut	Fehler relativ
Mengele LW 435	3000 kg / 2	3600 mm ²	12 cm	37,1 kg	4,4 %
Pöttinger EP II	3000 kg / 1	4900 mm ²	23 cm	12,5 kg	1,7 %
Mengele MZDK 8000	3000 kg / 2	3600 mm ²	1,5 cm	nicht ausgewertet	
Unsinn UKA 3-121	3000 kg / 2	3600 mm ²	6 cm	45 kg	5,2 %
John Deere 550	900 kg / 1	1000 mm ²	15 cm	1,8 kg	0,5 %

7.1.3 Wägezellen zwischen Achse und Rahmen

Der Einsatz der elastostatischen Wägezellen wurde aufgrund des hohen baulichen Aufwandes nur am Mengele Kipper MZDK 8000 durchgeführt. Beim Einsatz von anderen Druckkraftaufnehmern müßte je nach Aufnehmer eine optimale Krafteinleitung gewährleistet werden. Außerdem sollten die Kraftaufnehmer durch einen konstruktiven Überlastschutz (Anschlag) gesichert werden. Auf diese Maßnahme wurde in diesem Fall verzichtet.

Die Genauigkeit dieser Systeme ist sicherlich abhängig von der Genauigkeit der eingesetzten Wägezellen. Im durchgeführten Versuch wurden damit höchste absolute und relative Genauigkeiten mit 4,3 kg bzw. 0,5 % (95 %-VB bei 4 Durchgängen) erreicht (Abb. 34 und 35).

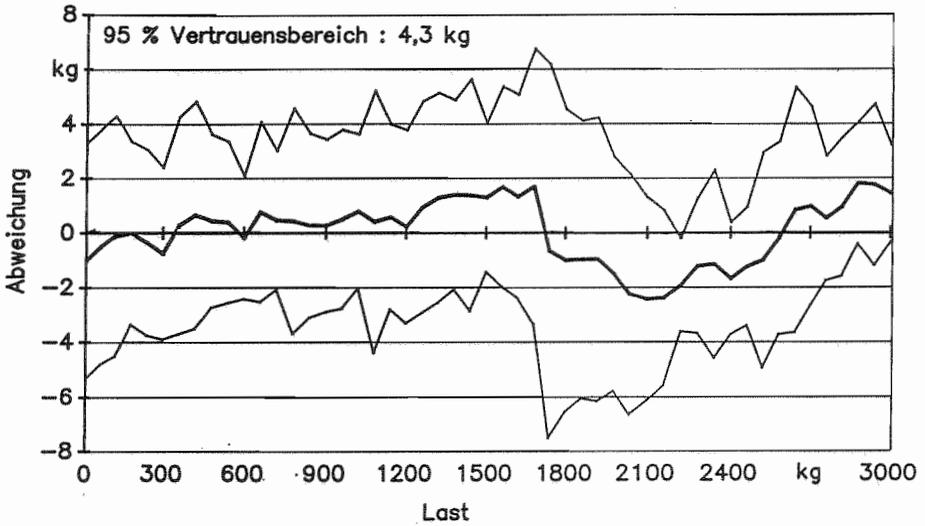


Abbildung 34: Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung im Kipper mit Druckkraftwägezellen.

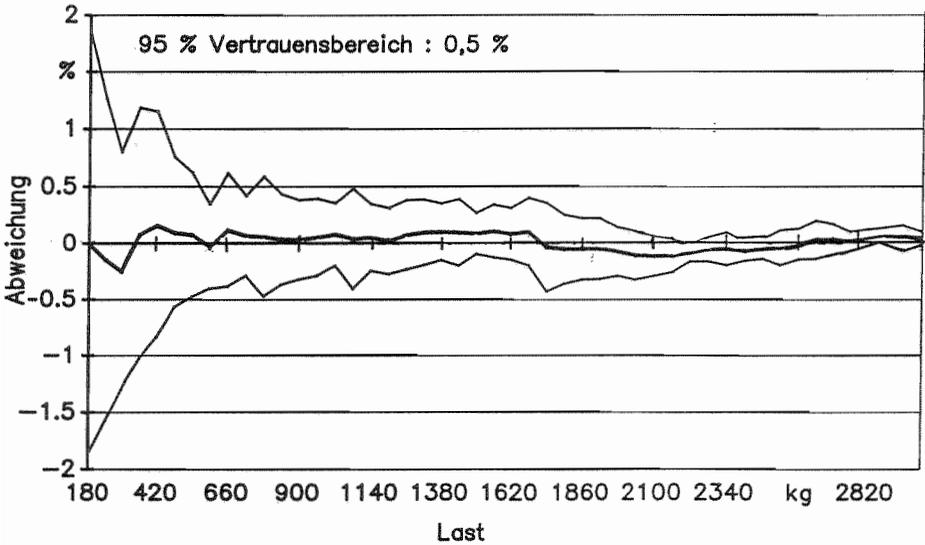


Abbildung 35: Relativer Fehler bei der Gewichtsermittlung im Kipper mit Druckkraftwägezellen.

7.1.4 Wägezelle in der Anhängerkupplung

Die modifizierte Anhängerkupplung stellt einen Lösungsansatz für ein integriertes Wiegesystem zur Messung der Deichselstützlast am Schlepper dar und ist somit unabhängig vom angehängten Fahrzeug. Hierbei wurde ein konstruktiver Überlastschutz bzw. die Entkoppelung der Wägezelle bei einer Transportfahrt mit berücksichtigt. Trotzdem müßte eine derartige Vorrichtung am Schlepper erst für eine Straßenzulassung geprüft und freigegeben werden. Allerdings bieten sich bei der Anhängerkupplung wesentlich bessere Möglichkeiten für einen Wägezelleneinsatz als beim Einbau in die Fahrzeuge.

Ebenso wie beim Kipper läßt sich auch bei der modifizierten Anhängerkupplung durch den Einsatz von Kraftmeßzellen eine hohe Genauigkeit erzielen. Wie aus den Abbildungen 36 und 37 ersichtlich, liegen der absolute, bzw. der relative Fehler bei 2,5 kg und 0,6 % (ermittelt aus 4 Be-/Entladezyklen).

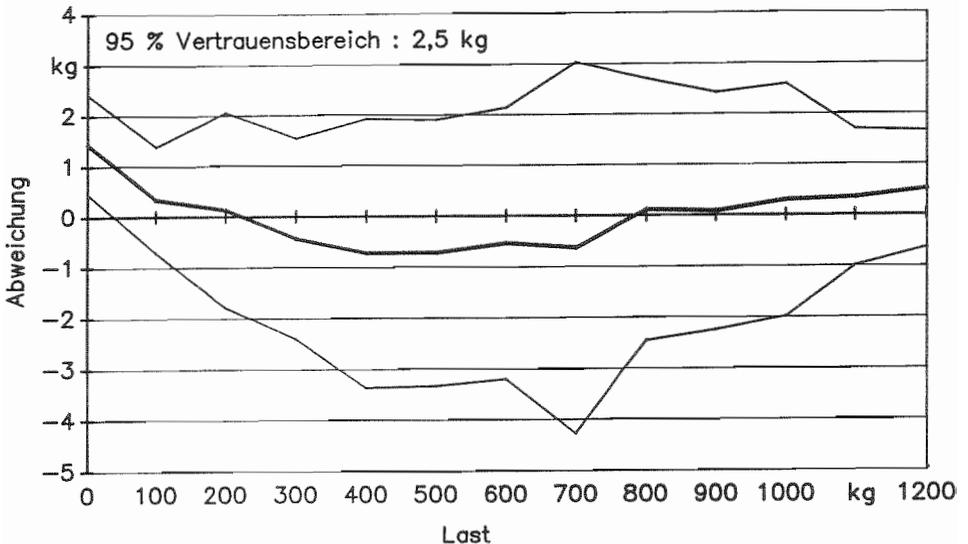


Abbildung 36: Absoluter Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Anhängerkupplung mit Wägezelle.

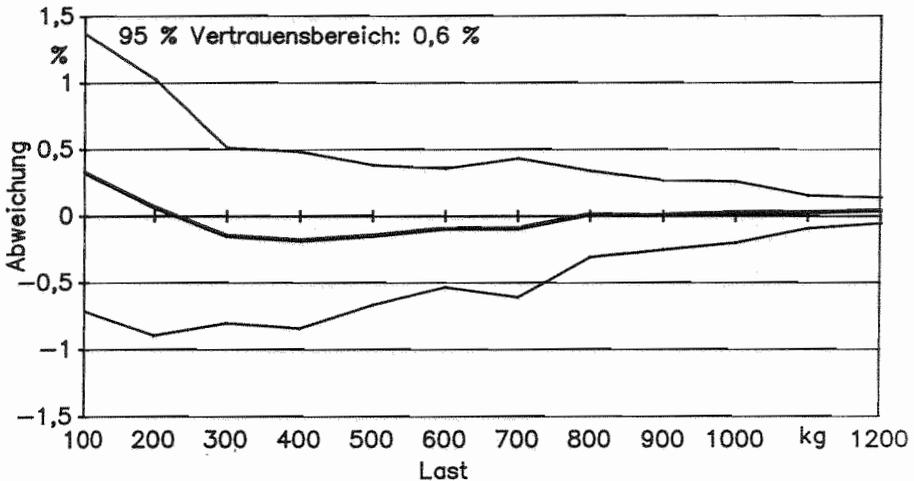


Abbildung 37: Relativer Fehler bei der Gewichtsermittlung in der Anhängerkupplung mit Wägezelle.

7.1.5 Praktische Wiegeergebnisse

Als Abschluß der statischen Versuche soll eine Untersuchung über die praktische Wiegegenauigkeit Aufschluß über die Umsetzung der zunächst gewonnenen Ergebnisse geben. Als Versuchsfahrzeug wurde aus folgenden Gründen die Rundballenpresse eingesetzt:

1. Die Rundballenpresse wurde bereits bei den statischen Versuchen mit einer praxistauglichen Elektronik untersucht und kalibriert.
2. Die Presse zeigte bei den statischen Versuchen den geringsten Fehler von allen Fahrzeugen.
3. Die Rundballen eignen sich in idealer Weise für eine Referenzmessung mit Hilfe einer Hängewaage.

Die Referenzwiegung wurde mit einer 500 kg-Zuglastzelle (Genauigkeitsklasse 0,1) am Schlepperfrontlader durchgeführt.

Bei den ersten Versuchen mit 11 Heurundballen (Abb. 38) betrug die maximale Abweichung + 22 kg bei einem durchschnittlichen Ballengewicht von 457 kg. Die Abweichung des Mittelwertes von + 4,5 kg

weist auf eine fehlerhafte Offset-Einstellung bei der Kalibrierung hin. Würde diese berücksichtigt, so ergäbe sich eine maximale Abweichung von + 17,5 kg.

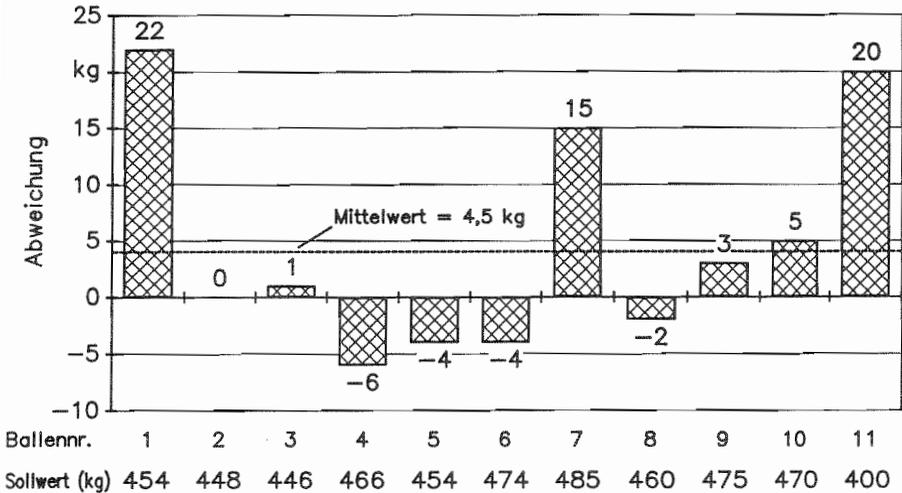


Abbildung 38: Praktische Wiegung von Heurundballen mit der Wiegeeinrichtung in der Rundballenpresse.

Vor einem weiteren, wesentlich umfangreicheren praktischen Einsatz bei 17 ha Sommergerstenstroh wurde die Wiegeeinrichtung neu kalibriert. Dieser Versuch wurde auf einem stark hügeligen Gelände durchgeführt (Abb. 39).

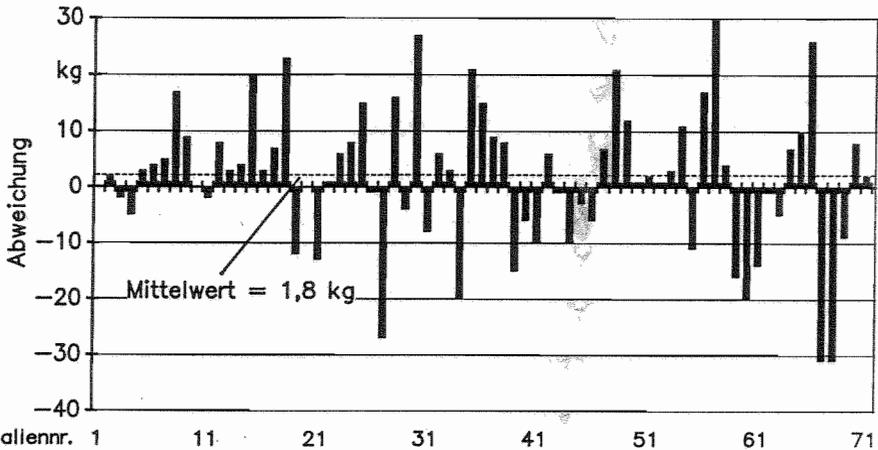


Abbildung 39: Praktische Wiegung von Strohrundballen mit der Wiegeeinrichtung in der Rundballenpresse.

Bei einer Gesamtstrohmenge von 17945 kg betrug die Abweichung bei 71 Ballen insgesamt + 135 kg bzw. 0,75 %. Das durchschnittliche Ballengewicht lag mit 253 kg um 1,8 kg über der Referenzmessung. Bei einer Einteilung in Fehlerklassen zeigt sich folgendes Resultat (Tab. 16):

Tabelle 16: Fehlerklassen bei prakt. Wiegung von Strohrundballen.

Abweichung	Anzahl absolut	Anzahl relativ
0 bis ±10 kg	46	65 %
±11 bis ±20 kg	16	22 %
±21 bis ±32 kg	9	13 %

Etwa zwei Drittel der gewogenen Ballen weisen einen Fehler unter ±10 kg auf. Die größeren Abweichungen (±20 - ±32 kg) sind mit großer Sicherheit auf die unterschiedliche Hebelarmlänge an der Deichsel zurückzuführen. Diese Beobachtung konnte bei einer Änderung des Auflagerpunktes bestätigt werden.

7.1.6 Diskussion der statischen Ergebnisse

Die Ergebnisse der statischen Untersuchungen zur Gewichtsermittlung zeigen deutlich, daß mit Hilfe von integrierten Wägesystemen auch in landwirtschaftlichen Fahrzeugen das Ladegewicht mit hoher Genauigkeit erfaßt werden kann.

Der Einsatz von **Wägezellen** beim 2-Achs-Kipper führte mit einem 95 %-Vertrauensbereich von 4,3 kg absolut und 0,5 % relativ zu den geringsten Abweichungen über einen Lastbereich von 3000 kg. Hinsichtlich der Genauigkeit bieten sich hier zudem noch Verbesserungsmöglichkeiten. So lassen sich bei einer konstruktiven Änderung des Fahrzeuges (Einsatz eines Doppelrahmens) die auftretenden Störkräfte minimieren. Ebenso bietet die in der Anhängerkupplung integrierte Wägezelle als Wiegeeinrichtung mit einem relativen Fehler von 0,5 % eine universelle und hochgenaue Möglichkeit zur Erfassung der Deichsellast am Schlepper beim Einachsanhänger. Der minimale Einfluß von Störkräften (Biegemomente, Drehmomente) rechtfertigt den höheren baulichen Aufwand für diese Vorrichtung. Insgesamt ist jedoch bei der Verwendung von Wägezellen der technische Aufwand wesentlich höher als bei der **Dehnungsmeßstreifenapplikation** auf Fahrzeugbauteilen.

Bei der Applikation von **Dehnungsmeßstreifen** an der Rundballenpresse zeigte sich, daß mit dieser Technik bei einer Genauigkeit von 0,5 % bzw. 1,8 kg je Ballen die Werte eines Wiegesystems mit Wägezellen erreicht und sogar übertroffen werden können. Dieses Ergebnis konnte im Praxiseinsatz bei der Ernte von 18 t Stroh auf extrem hügeligem Gelände mit einer relativen Abweichung von 0,75 % bestätigt werden. Ausschlaggebend neben der Güte der Applikation ist vor allem die Geometrie des Applikationskörpers und damit die Art der zu messenden Spannung. Weitestgehend unempfindlich gegen mechanische Störgrößen zeigte sich die an den Achsstummeln der Rundballenpresse verwendete Scherspannungapplikation. Zur Erhöhung der Empfindlichkeit und damit zur Verbesserung des Ergebnisses wurde dazu der Achsquerschnitt verringert. Da dies nicht in allen Fällen möglich ist, bietet sich auch die Erfassung der Biegespannung an. Der Einfluß von Biegemomenten führt aber besonders an der Achse zu großen Nicht-

linearitäten und zu entsprechend ungenauen Meßergebnissen. Dies ließ sich am Einachsladewagen mit einer Abweichung von 5,5 % bestätigen. An der Deichsel ist der Einfluß des Hebelarmes wesentlich geringer. Bedingt durch die flache Bauform ist die Deichsel zudem baulich besser für die Erfassung der Biegespannung geeignet. Bei den Versuchsmessungen konnte bei Abweichungen zwischen 0,5 % und 0,8 % eine hohe Genauigkeit festgestellt werden. Im praktischen Einsatz zeigte sich allerdings, daß die im Feld vorkommenden unterschiedlichen Neigungswinkel zwischen Schlepper und Gerät zu einer Verlagerung des Auflagerpunktes führen. Die damit bewirkte Veränderung des Hebelarmes und damit der Oberflächendehnung kann Abweichungen von ± 50 kg verursachen. Aus diesem Grunde wäre an dieser Stelle eine Bauteiländerung für die Anbringung einer Scherspannungsapplikation nötig.

Bedingt durch ihre Bauart sind **Dehnungsaufnehmer** lediglich für das Erfassen von einachsigen Spannungszuständen geeignet. Damit konnten sie an den Fahrzeugen nur für die Aufnahme der Biegespannung an den Achsen und an der Deichsel eingesetzt werden. Aufgrund der ungünstigen statischen Verhältnisse an den Achsen führte dies mit relativen Abweichungen von ca. 5 % zu schlechten Ergebnissen. Dagegen waren die Resultate der Dehnungsaufnehmer bei der Gewichtsermittlung über Biegespannung an der Deichsel mit Abweichungen zwischen 0,7 % und 1 % kaum schlechter als bei einer DMS-Applikation. Die Bauart der einzelnen Dehnungsaufnehmer hatte einen untergeordneten Einfluß auf die Genauigkeit des Gesamtsystems, die in diesem Fall als ungenügend eingestuft werden kann. Bedingt durch die einseitige Applikation zeigten sich die Dehnungsaufnehmer im Gegensatz zu den anderen Sensortechniken zudem sehr temperaturempfindlich.

7.2 Dynamische Messungen

Bei den dynamischen Gewichtsmessungen ist die Entwicklung eines methodischen Ansatzes auf Grund der Komplexität des Meßsystems äußerst schwierig. Die Konstanz der verschiedenen Einflußgrößen ist nur mit hohem Aufwand annähernd möglich. Wegen der unüberschaubaren Vielzahl von möglichen Versuchsvarianten wurde bewußt

eine Beschränkung auf relativ wenige Versuche mit jeweils spezifischen Fragestellungen vorgenommen.

Rein theoretisch ist das Dehnungsmeßstreifen-Verfahren durch seine technischen Eigenschaften ohne weiteres für höhere Frequenzen und auch für Dauerwechselbeanspruchung geeignet. Die Probleme bei den dynamischen Messungen beruhen deshalb nicht auf spezifischen Mängeln der Aufnehmer, sondern auf der Komplexität der Dynamik. Aus diesem Grund interessiert hier weniger das dynamische Verhalten des Kraftaufnehmers, sondern vielmehr jenes des gesamten Kraftmeßsystems.

Vereinfacht läßt sich ein ldw. Kipper oder Ladewagen als ein mehr oder weniger gedämpftes Feder/Masse-System [73] betrachten (Abb. 40).

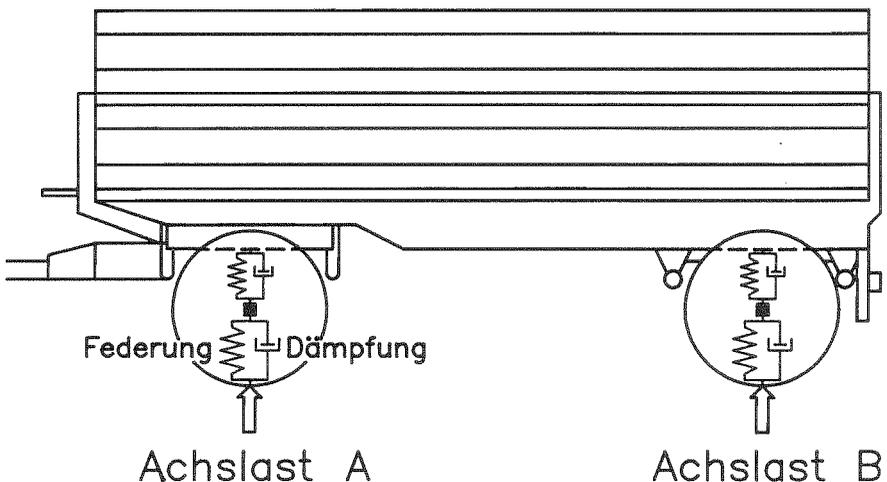


Abbildung 40: Schwingungersatzsystem für ein landwirtschaftliches Fahrzeug.

Dieses Ersatzsystem mit nur einer Feder, bzw. mit der Verrechnung von nur einer Federkonstanten, trifft natürlich nur sehr bedingt für die untersuchten Fahrzeuge zu. Am Beispiel des Mengele Kipper MZDK 8000 lassen sich mehrere unterschiedliche Federsysteme feststellen. Den größten Einfluß haben hier die Federung über die Bereifung und die Blattfederung. Aber auch jede DMS-Meßstelle

stellt aufgrund des auftretenden Meßweges bei Belastung ein Feder-Massesystem dar. Als Kriterium für das dynamische Verhalten des gesamten Kraftmeßsystems dient die Eigenfrequenz [42]. Diese läßt sich aus folgender Formel (nach Czichos [17]) berechnen:

$$(9) \quad f_0 = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{F}{m \cdot x \cdot dl}} = \frac{1}{2} \pi \sqrt{\frac{c}{m}}$$

f_0 : Eigenfrequenz
 F : Einwirkende Kraft
 m : Masse
 dl : Meßweg bei Nennkraft in mm
 c : Federkonstante
 π : 3,14159265...

Je steifer (niedriges dl) und je höher belastet das System ist, umso höher ist die Eigenfrequenz. Bei der Nennlast des Aufnehmers und einem Meßweg von 0,1 mm beträgt die Eigenfrequenz ca. 50 Hz, bei 0,3 mm nur noch ca. 29 Hz. Dies ist insofern wichtig, weil sich mit einem dynamischen Kraftmeßsystem nur Kraftstöße richtig erfassen lassen, deren zeitliche Änderung unterhalb der Eigenfrequenz des Meßsystems liegt. Dies hat zur Folge, daß schnellere Kraftänderungen in ihrer absoluten Größe nur teilweise und ab einer höheren Frequenz (im Bereich von einigen kHz) gar nicht mehr übertragen werden. Dadurch wird auf mechanischem Wege eine Glättung bzw. eine Filterung des Signalverlaufs erzeugt.

Für eine dynamische Gewichts-/ Ertragsermittlung wirken jedoch alle Kräfte außer der Gewichtskraft störend auf das Ergebnis und bewirken somit einen mehr oder weniger großen Fehler. Diese dynamischen Kräfte werden zum einen von der überfahrenen Fahrbahn und deren Unebenheiten und zum anderen von den Bewegungen des eingeschalteten Gerätes hervorgerufen. Diese dynamischen Anregungen unterliegen in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz und der Dämpfung einer bestimmten Vergrößerungs- bzw. Resonanzfunktion (Hütte [17]).

Nach Untersuchungen von WENDEBORN (1965) [73] liegen die von landwirtschaftlichen Fahrbahnen verursachten Anregungen in einem Bereich bis ca. 20 Hz. Er stellte auch fest, daß die Anregungsintensität (berechneter Wert für die absolute Größe der Anregungen

bei den einzelnen Frequenzen) wesentlich stärker von der Fahrbahn als von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst wird.

Die über den Zapfwellenantrieb übertragenen Störungen lassen sich vereinfacht aus der Antriebsdrehzahl berechnen. Unter der Annahme, daß diese Drehzahl an den einzelnen Aggregaten untersetzt wird, ist bei einer Antriebsdrehzahl von ca. 600 U/min von einer maximalen Erregungsfrequenz von 10 Hz auszugehen (Formel (10)).

$$(10) f = n / t$$

f : Frequenz in Hz
n : Drehzahl in U/min
t : Zeit in s

In Abhängigkeit von der Federsteifigkeit des jeweiligen Fahrzeuges ist daraus zu folgern, daß bei einer dynamischen Gewichtsermittlung in der Regel sowohl die Fahrbahnunebenheit als auch der Geräteantrieb über die Zapfwelle mit einem Großteil der erzeugten Frequenzen als Störgrößen erfaßt werden. Dies ließe sich nur über eine extrem weiche Fahrzeugfederung mechanisch verbessern; einer Maßnahme, die in der Regel nicht durchführbar ist.

Die durchgeführten Versuche sollen nun klären, inwieweit die theoretischen Überlegungen zutreffen und durch welche Möglichkeiten der Signalaufbereitung sich das dynamische Gewichtssignal glätten läßt bzw. ob die Angaben von WENDEBORN (1965) [73] auf die eigene Fragestellung zutreffen.

Für diese Untersuchungen wurden aus folgenden Gründen an den Fahrzeugen ausschließlich **Scherspannungsapplikationen (DMS)** an den Achsen und **Biegespannungsapplikationen (DMS)** an der Deichsel eingesetzt (Abb. 21):

- Diese Applikationen erwiesen sich in den statischen Versuchen als sehr genau.
- Zudem sind sie einfach und preisgünstig zu realisieren, auch bei einer Nachrüstung.
- Im Gegensatz zu den Wägezellen kann diese Sensorik ohne Bedenken auch bei schwierigsten dynamischen Verhältnissen eingesetzt werden.
- Die Erfassung der Biegespannung an den Achsen scheidet durch

den stark wechselnden Hebelarm aus. Der Auflagerpunkt der Reifen ändert sich während der Fahrt ständig.

Untersuchungen zur dynamischen Gewichtsermittlung in der Schlepperdreipunkthydraulik zeigten, daß die Genauigkeit der eingesetzten Sensoren nur einen geringen Einfluß auf die Gesamtgenauigkeit der dynamischen Gewichtsermittlung hat [2, 3, 54, 55].

Außerdem wurden in den Untersuchungen nur die Systeme mit der höchsten Genauigkeit (Rundballenpresse und Pöttinger Erntewagen) eingesetzt.

7.2.1 Verrechnung mit Beschleunigungskräften

Die Erfassung der Beschleunigungskräfte an den einzelnen Fahrzeugen, bzw. an den einzelnen Bauteilen, soll mehrere Fragen klären:

- Wie hoch sind die maximal auftretenden Beschleunigungskräfte und welche Überlastfestigkeit ist damit für die zur Gewichtsermittlung eingesetzte Sensorik zu fordern?
- Existieren an den einzelnen Sensorapplikationsstellen Unterschiede in der Höhe der auftretenden Beschleunigungskräfte?
- Wie reagieren die Beschleunigungskräfte auf die unterschiedlichen Einflußfaktoren?
- Läßt sich über eine Verrechnung mit den Beschleunigungswerten der Fehler bei der dynamischen Gewichtsermittlung verringern?

7.2.1.1 Maximale Beschleunigungswerte

Die Untersuchungen an den Fahrzeugen ergaben, daß sich die zusätzlich zur Erdbeschleunigung auftretenden Beschleunigungskräfte in einem Bereich von maximal ± 2 g bewegen. Aus der Abbildung 41 läßt sich der Zusammenhang zwischen Gewichts- und Beschleunigungswerten beim Pressen von Grassilage erkennen.

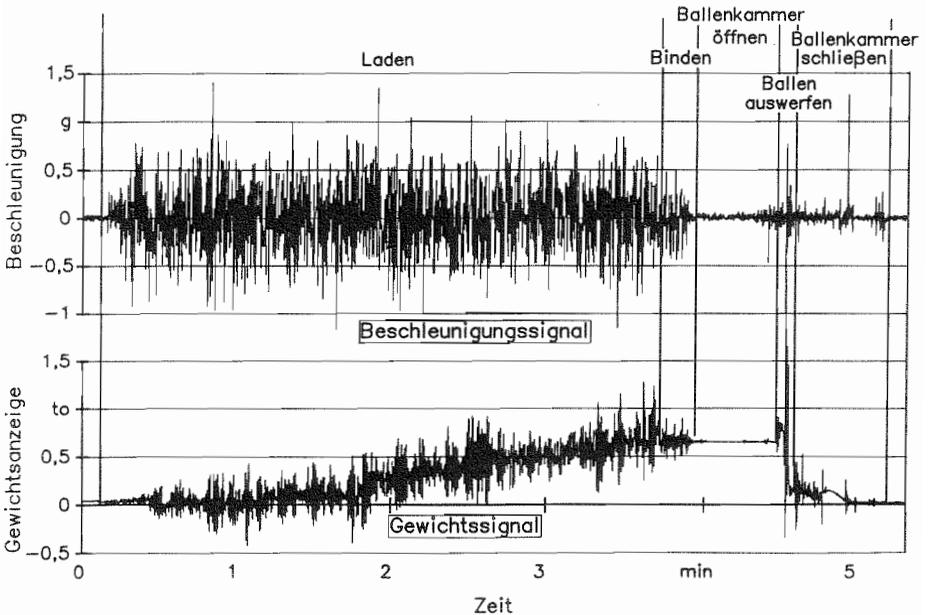


Abbildung 41: Beschleunigungskräfte an der Achse der Rundballenpresse beim Pressen von Grassilage.

Daraus wird der Zusammenhang zwischen den gemessenen dynamischen Gewichtswerten, die das 2- bis 3-fache der Belastung (aufgebrachte Last und Eigengewicht des Fahrzeugs) betragen, und den Beschleunigungswerten ersichtlich. Die Ableitung ergibt sich aus der Formel (11)

$$(11) F = m \cdot a$$

F : Kraft (hier Gewichtskraft)
m : Masse des Körpers
a : Beschleunigung

7.2.1.2 Beschleunigungskräfte an unterschiedlichen Sensorapplikationsstellen

Die Spannweite der auftretenden Kräfte schwankt jedoch in Abhängigkeit von der Applikationsstelle und den verschiedenen

Einflußfaktoren in einem weiten Bereich. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, daß sich die Massenverteilung des Fahrzeuges durch die Abstützung in drei Punkten mit einer zusätzlichen Kraftübertragung über die Zapfwelle ständig ändern kann.

An der Deichsel sind die Beschleunigungskräfte wesentlich höher als in der Achsmitte oder auch direkt am Rad (Abb. 42).

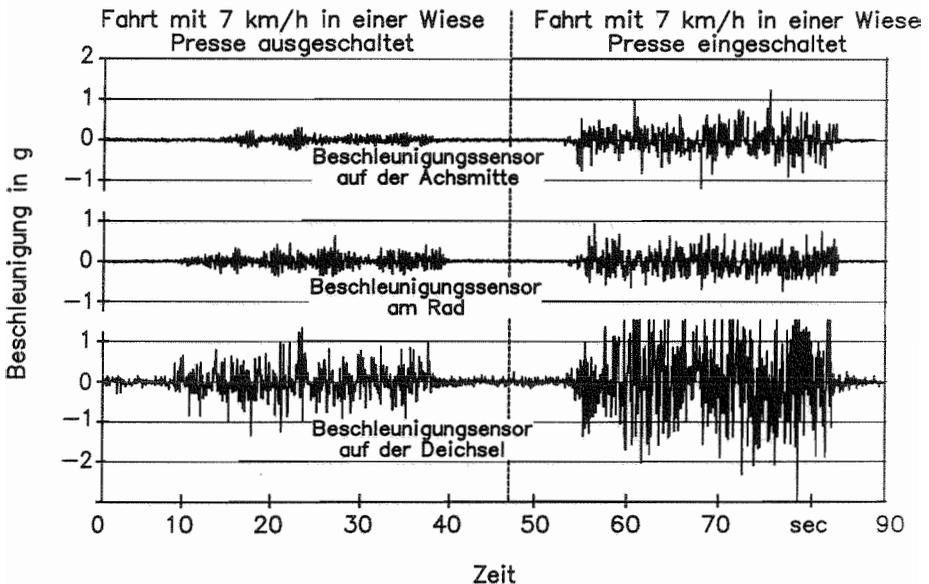


Abbildung 42: Beschleunigungskräfte an unterschiedlichen Applikationsstellen bei der Rundballenpresse.

Die Federung durch die Räder wirkt in diesem Fall dämpfend auf die Beschleunigungskräfte an der Fahrzeugachse. An der Deichsel ist diese Dämpfung wesentlich geringer. Dagegen wirken an dieser Stelle sowohl Beschleunigungskräfte von der Presse als auch vom Schlepper. Bei einer Resonanz der anregenden Schwingungen kann es zu einer Erhöhung der auftretenden Kräfte kommen.

Aus der Berechnung des arithmetischen Gesamtmittelwertes der Beschleunigungskräfte über der Versuchsstrecke (150 m) wird ersichtlich, daß dieser bei allen Fahrzeugen und Applikations-

stellen mit dem statischen Wert vor und nach der Fahrt übereinstimmt. Dies bedeutet, daß sich die vertikalen Beschleunigungskräfte erwartungsgemäß ausgleichen.

Hingegen führt die Berechnung des gleitenden Mittelwertes in Abhängigkeit von der Anzahl der gemittelten Werte zu einer mehr oder weniger großen Abweichung vom Gesamtmittelwert (Abb. 43).

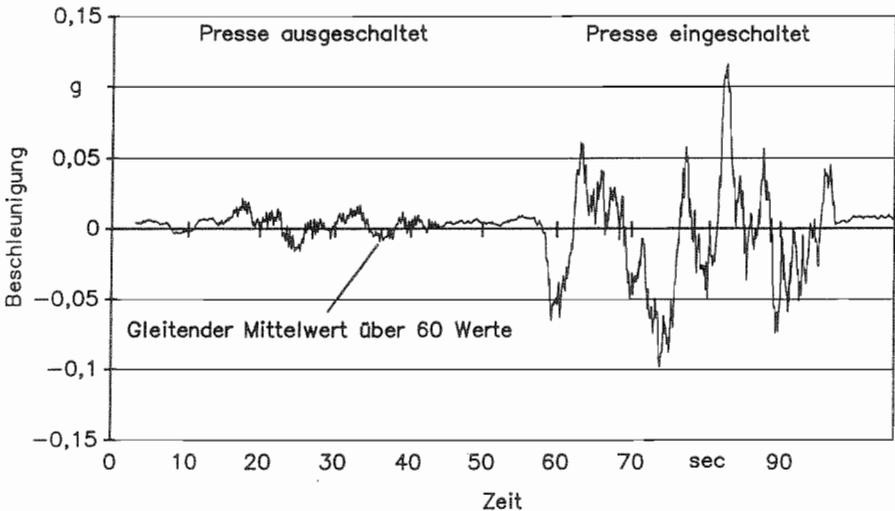


Abbildung 43: Gleitender Mittelwert der Beschleunigungskräfte an der Achse der Rundballenpresse.

7.2.1.3 Reaktion auf unterschiedliche Einflußgrößen

Neben der Applikationsstelle wirken die verschiedenen Einflußgrößen in unterschiedlichem Maße auf die Größe der Beschleunigungskräfte. Hierbei hat auch das jeweilige Fahrzeug einen erheblichen Einfluß. Während sich zum Beispiel die Werte nach dem Einschalten der Zapfwelle beim Ladewagen kaum änderten (Abb.44), zeigte sich bei der Rundballenpresse ein extremer Anstieg der Beschleunigungskräfte (Abb. 45).

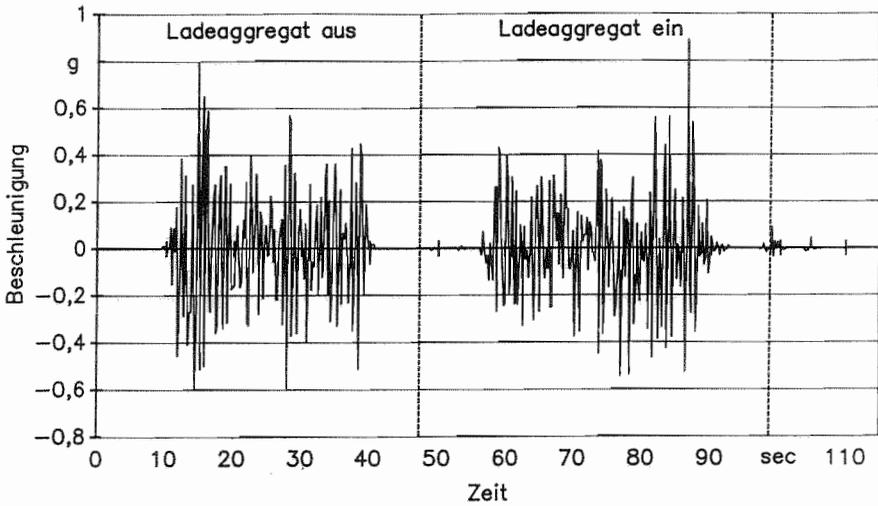


Abbildung 44: Beschleunigungskräfte während der Fahrt beim Einachsladewagen mit Sensor auf der Achse.

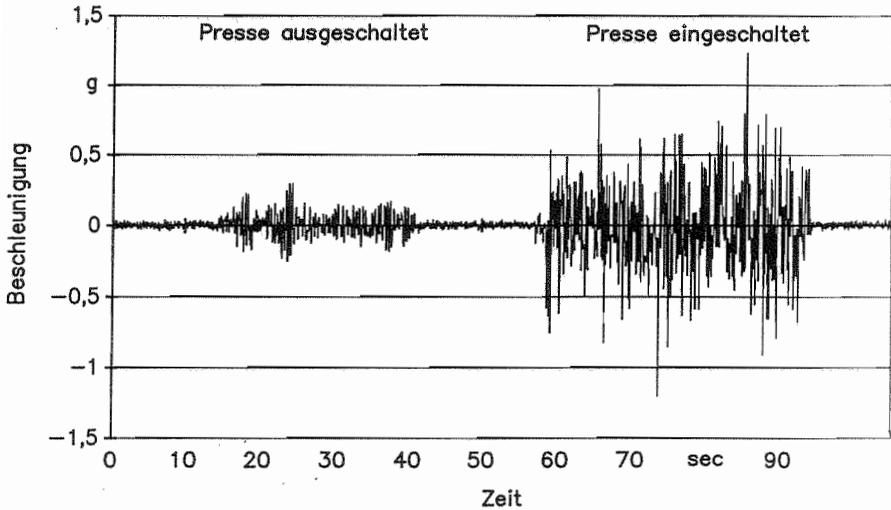


Abbildung 45: Beschleunigungskräfte während der Fahrt bei der Rundballenpresse mit Sensor in der Achsmitte.

7.2.1.4 Verrechnung von Gewichts- und Beschleunigungswerten

Bei der Untersuchung der auftretenden Vertikalbeschleunigungen ist jedoch die wichtigste Frage, wie und unter welchen Voraussetzungen sich das dynamisch erfaßte Gewichtssignal mit Hilfe des Beschleunigungssignals in der Genauigkeit verbessern läßt.

Ausgehend von der Überlegung, daß die dynamische Komponente des Gewichtssignals weitgehend durch Beschleunigungskräfte hervorgerufen wird, müßte es möglich sein, bei der Verrechnung beider Signale (Abb. 46) die statische Komponente des Gewichtssignals herauszufiltern.

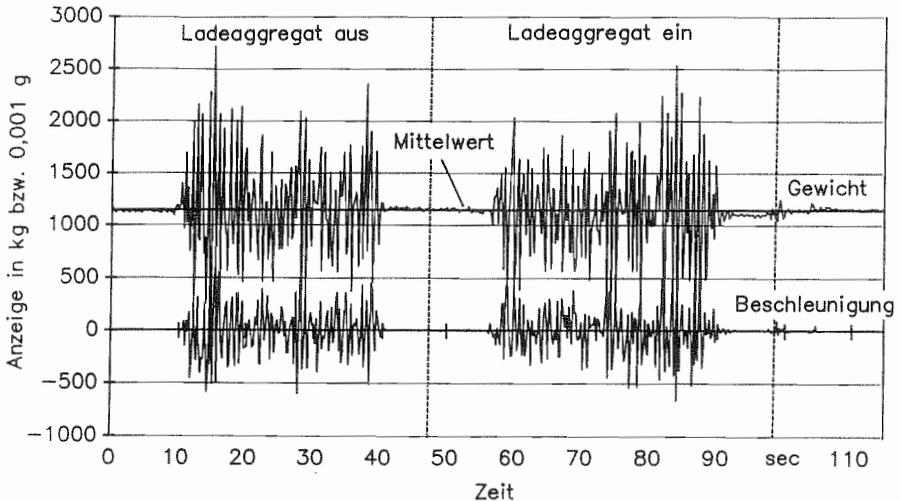


Abbildung 46: Gleichzeitig erfaßtes Gewichtssignal und Beschleunigungssignal am Ladewagen (Achse).

In der Abbildung 46 ist der zeitliche Verlauf des an der Achse erfaßten Gewichtssignales und dessen Mittelwert zusammen mit den an der Achsmitte gemessenen vertikalen Beschleunigungswerten dargestellt.

Ohne Zweifel ist zwischen beiden Meßwerten ein Zusammenhang zu erkennen. Allerdings ist die Erfassungsrate von 4 Werten pro

Sekunde für die Beurteilung über den Zusammenhang zwischen beiden Kurven vorläufig zu gering. Bei einer dynamischen Messung mit 18 Hz ist bei einer gedehnten x-Achse (Abb. 47) dagegen die zeitliche Überlagerung des dynamischen Gewichtsverlaufes und der Beschleunigungswerte an der Achse klar ersichtlich.

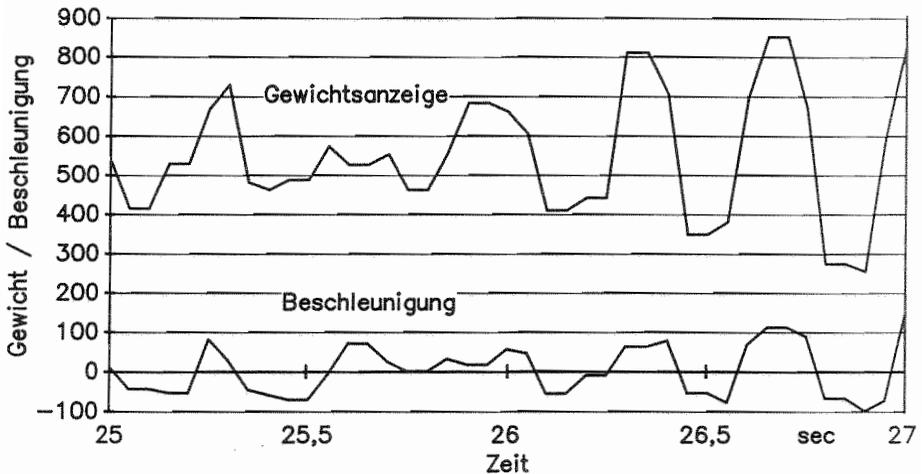


Abbildung 47: Dynamisches Gewichts- und Beschleunigungssignal an der Achse der Rundballenpresse.

Während an der Achse eine größere Abhängigkeit von beiden Signalen vorliegt, sind an der Deichsel nahezu keine Zusammenhänge zu finden. Offensichtlich wirken hier durch die Überlagerung der Schwingungen von Schlepper und Maschine zusätzliche Kräfte auf die Sensorapplikation zur Gewichtserfassung.

Aufgrund des nicht befriedigenden Ergebnisses in diesen Versuchen sollte ein weiterer Versuch klären, inwieweit der Einbauort des Sensors einen Einfluß ausübt. Der Einsatz des Beschleunigungssensors am Achsstummel bzw. in der Mitte am Rahmen zwischen beiden Achsstummeln erbrachte keinen wesentlichen Unterschied hinsichtlich der Korrelation zum Gewichtssignal (Radlast bzw. Achslast). Daraus läßt sich folgern, daß für eine Verrechnung des Beschleunigungssignals mit dem Gewichtssignal ein Beschleunigungssensor in der Achsmitte ausreichend ist.

7.2.2 Signalaufbereitung

Insgesamt erbrachte die Verrechnung des dynamischen Gewichtssignales mit den Beschleunigungswerten kein befriedigendes Ergebnis. Deshalb sollte die Möglichkeit, die dynamischen Störungen des Meßsignals durch verschiedene statistische Methoden der Signalaufbereitung zu verringern oder zu eliminieren, als nächstes untersucht werden.

7.2.2.1 Digitale Filterung

Zur weiteren mathematischen Aufbereitung der Rohsignale bietet sich nach KREUZER [35] die Filterung an. Diese läßt sich sowohl über die Hardware als auch über die Software realisieren. Im vorliegenden Fall wurde eine nachträgliche digitale Filterung zur Reduzierung der Störschwankungen durchgeführt, insbesondere weil damit eine Vielzahl von unterschiedlichen Filtertypen mit den verschiedensten Parametern zur Verfügung stehen.

Um einen Filter effektiv einsetzen zu können, müssen zunächst die Rohsignale hinsichtlich ihrer Frequenzspektren analysiert werden. Zur Übertragung eines Signals aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich steht mit der Fast-Fourier-Transformation (FFT) eine umfangreiche mathematische Methode zur Verfügung. Sie ermöglicht die Untersuchung der Frequenzspektren für die einzelnen Signale hinsichtlich der Häufigkeit der auftretenden Frequenzen.

Das Ergebnis einer FFT-Analyse (Power-Spektrum) für die Rohsignale des Gesamtgewichtes und der Achsbeschleunigung an der Rundballenpresse ist grafisch in Abbildung 48 dargestellt.

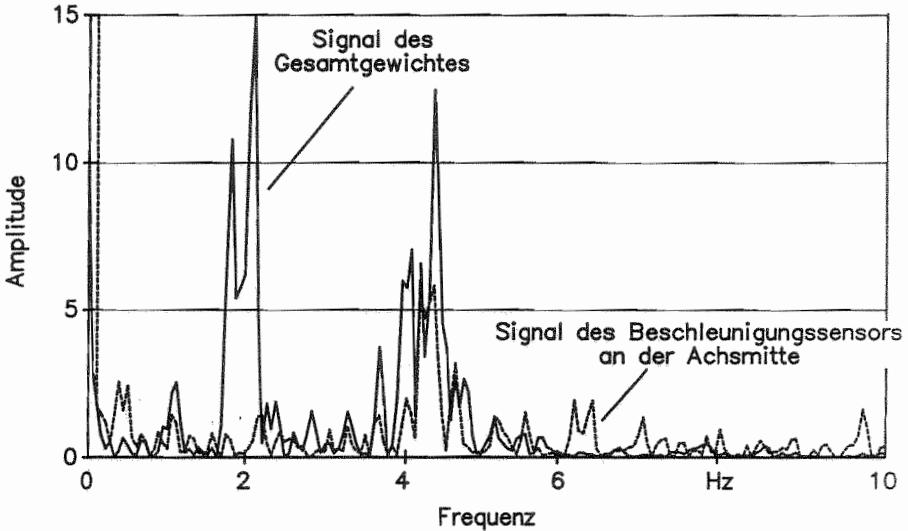


Abbildung 48: FFT vom Gesamtgewichtssignal und vom Beschleunigungssignal an der Achse der Rundballenpresse.

Darin sind die Häufigkeiten der einzelnen Schwingungen bis zu einer Frequenz von 10 Hertz dargestellt. Es wird ersichtlich, daß im Frequenzbereich von 0 bis 6 Hz verschiedene Schwingungsanteile mit einem Maximum bei 2 und bei 4,5 Hz auftreten. Kleinere, gleichbleibende Anteile finden sich bis zum untersuchten Grenzwert. Dennoch bestätigen die FFT-Analysen der dynamischen Signale die theoretischen Überlegungen zu den möglichen auftretenden Schwingungsfrequenzen bis ca. 10 Hz.

Allerdings sind neben diesen Frequenzbanden bei sämtlichen dynamischen Gewichtssignalen auch sehr hohe Amplitudenwerte bei 0 Hz (in der Abbildung angedeutet) vorhanden. Daraus ist zu schließen, daß ein hoher Anteil der überlagerten dynamischen Störungen nicht auf periodisch erregte Schwingungen sondern auf unregelmäßige Einflüsse zurückzuführen ist. Damit verringert sich die Möglichkeit der vollständigen Unterdrückung der Signalstörungen durch den Einsatz eines Filters erheblich.

Zur Filterung von höherfrequenten Schwingungsanteilen ist ein Tiefpaßfilter erforderlich. In diesem Fall wurde ein "Butterworth-Tiefpaß" mit einer extrem niedrigen Grenzfrequenz von 0,5 Hz eingesetzt. Damit läßt sich eine erhebliche Verringerung der Signalschwankungen erreichen (Abb. 49).

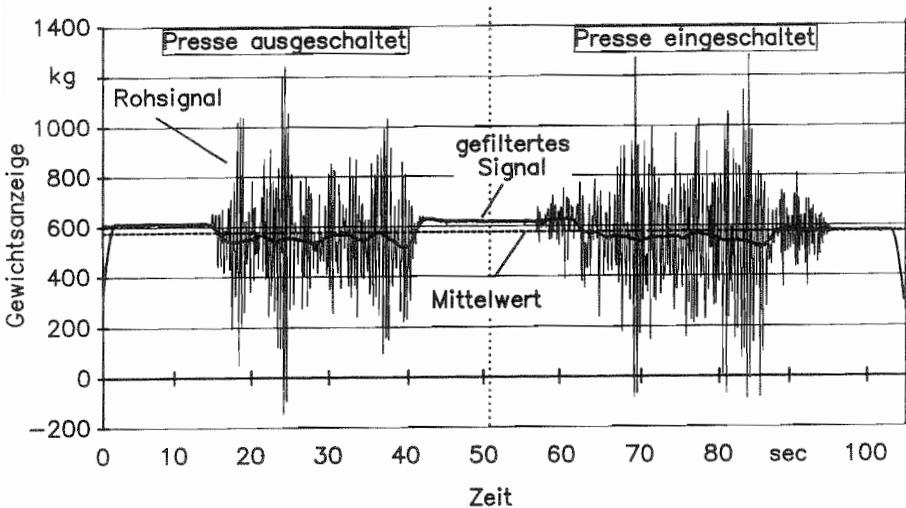


Abbildung 49: Dynamische Gewichtsermittlung in der Rundballenpresse vor und nach einer Tiefpaßfilterung.

Trotzdem verbleibt eine Spannweite des Signals und damit ein Fehler bei der Gewichtsermittlung von 30 bis 100 kg für das gesamte Fahrzeug. Bedingt durch die nicht-periodischen Signalanteile liegen die Abweichungen vom Istwert nach einer digitalen Filterung immer noch bei ca. 10 - 15 %.

7.2.2.2 Mittelwertbildung

Neben dieser digitalen Filterung stellt die Berechnung des Mittelwertes im Prinzip die einfachste Stufe einer Signalfilterung dar. In diesem Fall existieren unterschiedliche Methoden der Mittelwertberechnung. Der Gesamtmittelwert läßt sich ebenso wie ein gleitender Mittelwert nach folgenden Methoden [60] berechnen:

1. Arithmetischer Mittelwert
2. Geometrischer Mittelwert
3. Harmonischer Mittelwert
4. Quadratischer Mittelwert

Die Berechnung der dynamischen Daten nach allen vier Methoden erbrachte nur geringfügige Unterschiede im Ausgangssignal. Aus diesem Grund beziehen sich die nachfolgenden Betrachtungen auf den für die Signalverarbeitung wichtigsten, den linearen oder arithmetischen Mittelwert.

Bei einem sich ändernden Gewichtssignalverlauf, wie es z. B. beim Laden von Futter der Fall ist, bietet sich der gleitende Mittelwert zur Berechnung an. In Abhängigkeit von der Abtastfrequenz gilt es die optimale Methode der gleitenden Mittelwertbildung zu finden.

Dafür existieren 3 Methoden [60] zur Berechnung :

1. Nichtrekursive Methode
2. Rekursive Methode
3. Glättung

Die nichtrekursive Methode beruht darauf, den Mittelwert über die vergangene Anzahl von Meßwerten zu bilden. Jeder neue Meßwert wird zur bestehenden Summe addiert und die Gesamtsumme durch die neue Anzahl an Werten geteilt. Der auf diese Weise berechnete Mittelwert kann dem tatsächlichen Signalverlauf nur sehr langsam folgen und ist deshalb für die dynamische Gewichtsermittlung ungeeignet.

Bei der rekursiven Methode werden jeweils nur die letzten n Werte für die Berechnung des Mittelwertes herangezogen. Bei jedem neuen Wert fällt der zeitlich älteste Wert aus der Berechnung heraus. Hierbei entscheidet die Anzahl der Werte über die zeitliche Verzögerung des Signalverlaufes. In der Praxis ist ein guter Kompromiß zwischen einer ausreichenden Unterdrückung der dynamischen Störungen einerseits und dem qualitativen Erhalt der Kurvenform des Eingangssignales andererseits zu finden. Diese Methode kann nicht nur zur nachträglichen Berechnung des Signalverlaufes, sondern auch für die Online-Erfassung eines dynamischen

Gewichtssignales herangezogen werden. Durch diese Möglichkeit und den einfachen mathematischen Rechenweg bietet sich deshalb die rekursive Methode für die Berechnung bei der dynamischen Gewichtsermittlung an. Zusätzlich wird damit gegenüber der nichtrekursiven Methode eine erhebliche Datenreduktion und eine Verminderung des Speicherbedarfes erreicht.

Im Gegensatz zu den beiden vorgenannten Methoden, bei denen der Rechenwert erst nach n Messungen, also zeitverzögert zur Verfügung steht, werden bei der Glättung $n/2$ Werte vor und $n/2$ Werte nach dem aktuellen Meßwert zur Berechnung herangezogen. Damit läßt sich eine zeitliche Verzögerung vermeiden. Allerdings ist diese Methode nur sinnvoll bei einer nachträglichen Aufbereitung der Daten einzusetzen.

Für die qualitative Beurteilung der Signaldämpfung spielt es keine Rolle, ob das Ausgangssignal mit einem gleitenden Mittelwert oder mit einer Glättung berechnet wurde.

Bei den hier vorgestellten Ergebnissen wurde der gleitende, arithmetische Mittelwert über die jeweils angegebene Länge berechnet (Abb. 50 und Abb. 51).

Danach können mit dieser Methode die dynamischen Störungen des Signals auf ca. 15% verringert werden, ohne damit den tatsächlichen Signalverlauf erheblich zu verändern. Die Mittelwertbildung erfolgte über einen Zeitraum von 2,5 Sekunden. Bei einer Verdoppelung dieser Mittelungszeit lassen sich die Signalschwankungen auf Werte unter 10 % dezimieren. Dies entspricht dem oben erwähnten optimalen Kompromiß zwischen der bestmöglichen Dämpfung bei einer geringstmöglichen qualitativen Änderung des Kurvenverlaufes. In absoluten Werten betragen die Restschwankungen je nach Untersuchung ± 50 kg bis ± 150 kg für das gesamte Fahrzeug bei einer gleitenden Mittelwertbildung über 60 Werte (5 sec).

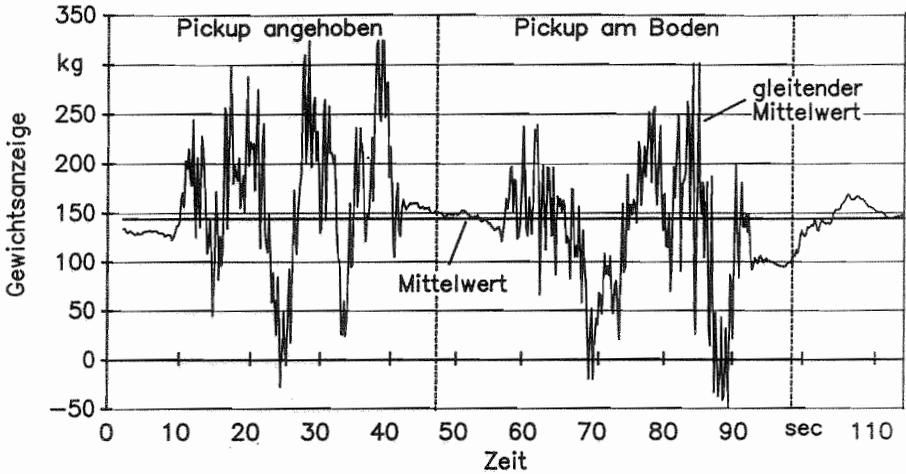


Abbildung 50: Gleitender Mittelwert über 60 Werte bei der dynamischen Gewichtsermittlung am Einachsladewagen.

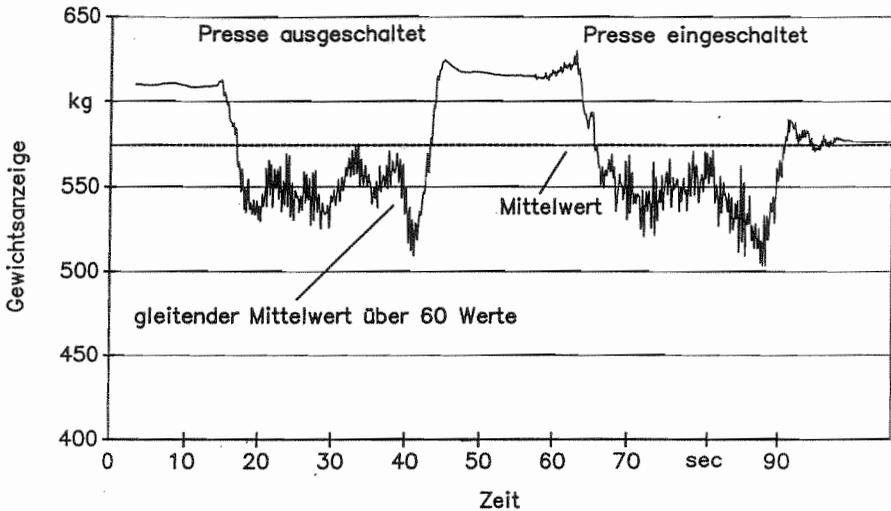


Abbildung 51: Gleitender Mittelwert über 60 Werte bei der dynamischen Gewichtsermittlung an der Rundballenpresse.

Der abschließende Vergleich bei der dynamischen Erfassung des Gewichtswertes an der Deichsel und der Achse des Einachs-Ladewagens beim Laden zeigt den Unterschied zwischen dem ungeglätteten (Abb. 52) und dem durch eine Mittelwertberechnung über 10 Werte geglätteten (Abb. 53) Signalverlauf recht deutlich.

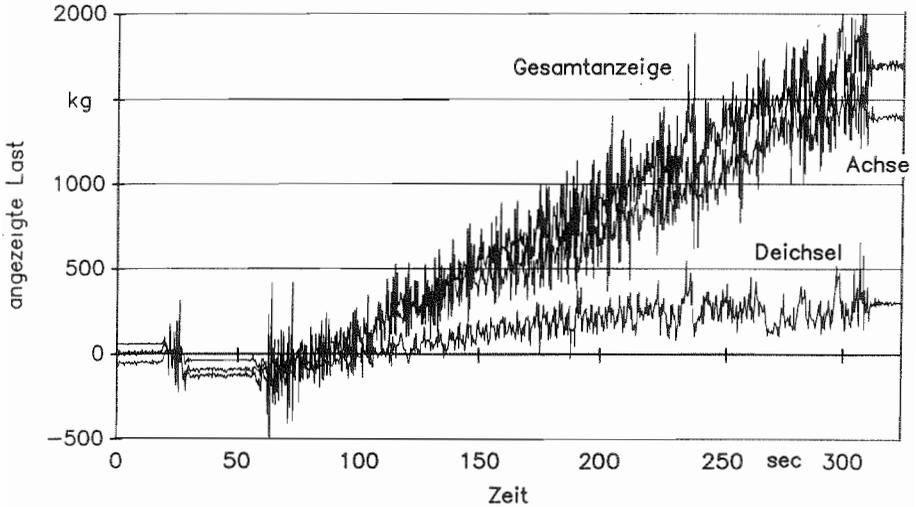


Abbildung 52: Dynamische Gewichtsermittlung beim Laden mit dem Einachsladewagen (300 m; 4 Werte/sec; Rohwerte).

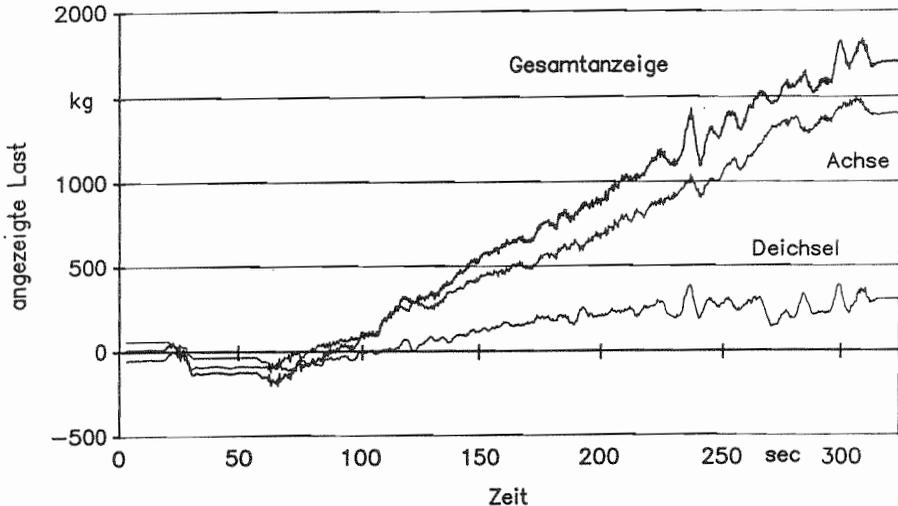


Abbildung 53: Dynamische Gewichtsermittlung beim Laden mit dem Einachsladewagen (300 m; 4 Werte/sec; gleitender Mittelwert aus 10 Werten).

In beiden Fällen läßt sich am Anfang der Fahrt recht deutlich das Absenken der Pickup erkennen. Die verbleibenden Schwankungen sind an der Deichsel wesentlich höher als an der Achse. Dieser Einfluß dürfte durch die Hebelarmwirkung bei der Biegespannungsapplikation verursacht werden. Hieraus entsteht wiederum die Forderung nach einer Scherspannungsapplikation auch an der Deichsel.

7.2.3 Diskussion der dynamischen Ergebnisse

Die Erfassung der Beschleunigungskräfte erbrachte zunächst eine Aussage über die nötige Auslegung der Sensorik um eine Beschädigung durch Überlastung zu vermeiden. Aufgrund der auftretenden Vertikalbeschleunigungskräfte von $\pm 1,5$ g und den damit hervorgerufenen Gewichtskräften ist aus Sicherheitsgründen mindestens eine dreifache Überlastfestigkeit der Sensorik zu fordern. Dieses Ergebnis bestätigt die grundlegenden Untersuchungen von JUNGERBERG [30] und von WENDEBORN [73]. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß an der Deichsel wesentlich höhere Beschleu-

nigungskräfte auftraten als an der Achse. Zu erklären ist dies durch die geringere Dämpfung an diesem Bauteil.

Bei der Rundballenpresse führt das Einschalten der Zapfwelle im Gegensatz zum Ladewagen zu einer erheblichen Zunahme der Beschleunigungskräfte. Im Verhältnis zum Eigengewicht werden bei der Rundballenpresse relativ hohe Lasten über den Zapfwellenantrieb bewegt.

Obwohl zunächst anzunehmen war, daß durch eine Verrechnung der Gewichtswerte mit den Beschleunigungswerten eine Kompensation der dynamisch erfaßten Signalschwankungen möglich wäre, konnte dies nicht bestätigt werden. Während die gemessenen Werte an den Fahrzeugachsen eine höhere Korrelation zwischen Gewichts- und Beschleunigungssignal ergaben als die Werte an den Deichseln, bringt die Verrechnung der Signale keine erhebliche Verbesserung für die dynamische Erfassung des Gewichtes. Im Vergleich zu den mathematischen Methoden der Signalaufbereitung ist der hohe technische und finanzielle Aufwand für die Erfassung der Beschleunigungskräfte zur Optimierung der dynamischen Gewichtsermittlung nach diesem Ansatz nicht lohnend. Dagegen wäre zukünftig die Frage zu klären, ob, und wenn ja an welchem Ort, sich aufgrund einer dynamischen Beschleunigungsmessung optimale Bereiche zum Erfassen der Gewichtskraft finden lassen. Die Beschleunigungssensoren könnten also anzeigen, zu welchem Zeitpunkt auf das Fahrzeug keine Beschleunigungskräfte wirken.

Die Möglichkeiten von Mikroprozessoren in Auswerteeinheiten und von Bordrechnern erlauben heute den Einsatz der digitalen Signalaufbereitung. In diesem Fall bieten sich sowohl eine digitale Filterung als auch die Berechnung des gleitenden Mittelwertes zur Signalaufbereitung an. Beide Methoden erbrachten bei der dynamischen Gewichtsermittlung in Abhängigkeit von den eingestellten Parametern (Filterart, Filterordnung, Grenzfrequenz - Länge der Mittelwertbildung) eine Verringerung der dynamischen Ausschläge auf ca. 10 - 15 % der maximalen Schwankungen. Diese Schwankungen betragen abhängig von den Einflußgrößen das 0,5 bis 1,5-fache der Belastung. Die Belastung setzt sich aus dem Eigengewicht des Fahrzeuges und dem Ladegewicht zusammen. Mit

diesen beiden Methoden läßt sich somit das absolute Ladegewicht auf $\pm 10 \%$ genau während des Ladens ermitteln. Für eine Durchsatzmessung, die als Grundlage für die lokale Ertragsermittlung nötig ist, ist der verbleibende Fehler allerdings sehr groß. Hier bietet sich nur die Durchsatzermittlung über einen längeren Zeitraum bzw. über eine längere Wegstrecke an. Damit würde dieser dynamische Fehler in der Relation zu dem geladenen Gewicht relativ verringert. Zudem könnte eine Verrechnung der statischen Wägungen (jeweils am Schlagende) zur Korrektur des dynamischen Gewichtsverlaufes zu einer wesentlich höheren Genauigkeit der Ertragsermittlung führen.

8. Verfahrenstechnische Einordnung der Ergebnisse

Während bei der Ernte von Körnerfrüchten die Durchflußmessung [3; 4] die optimale Methode zur Ertragsermittlung darstellt, kann dieses Prinzip bei Grüngut aus technischen Gründen allenfalls im Feldhäcksler realisiert werden. Damit entfällt auch die Möglichkeit einer ausschließlich dynamischen Ertragsermittlung.

Wie die Untersuchungen mit integrierten Wiegesystemen an Ernte- und Transportfahrzeugen zeigen, ist eine Ertragsfeststellung über die statische Gewichtsermittlung auf dem Feld mit einem Fehler unter 2 % (95 %-Vertrauensbereich) zu realisieren.

Die dynamische Messung der Gewichtswerte während der Fahrt ist als zukünftiges Verfahren zur Ertragsermittlung anzusehen. Hier stellt sich allerdings die Frage, mit welchen Methoden und bei welchem Aufwand die genannte Fehlergrenze von 2 % ebenfalls zu erreichen ist.

8.1 Funktionssicherheit

Bei den Aussagen über die Funktionssicherheit der eingesetzten Technik muß zwischen den Sensoren und der Elektronik unterschieden werden.

Eine differenzierte Beurteilung der Elektronik erübrigt sich an dieser Stelle. Die Robustheit von speziellen Meß-, Steuer-, und Regelungselektroniken konnte in hunderttausenden von industriellen Anwendungen [31, 34, 60, 63] und in tausenden von landwirtschaftlichen Anwendungen [4, 12] nachgewiesen werden. Bei den in den einzelnen Versuchen eingesetzten Elektroniksystemen trat in 5 Versuchsjahren kein Ausfall auf. Diese Beobachtung bestätigt die oben gemachten Ausführungen.

Dagegen sind bei den einzelnen Sensoren durchaus Unterschiede hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit für den extremen Einsatz in landwirtschaftlichen Transportfahrzeugen festzustellen [44, 57].

Obwohl bei den Wägezellen keine Störungen auftraten, ergeben sich besonders bei den elastostatischen Wägezellen in der derzeitigen Bauform einige Probleme. Diese Sensoren sind bedingt durch das Kolben - Zylindersystem nur für die Aufnahme von Druckkräften geeignet. Bei großen Zugkräften, die an der Fahrzeugachse über ein Biegemoment, z. B. beim Einsinken der Räder in den Boden auftreten können, besteht die Gefahr, daß der Kolben aus dem Zylinder gerissen wird. Bei diesen Sensoren muß deshalb eine mechanische Sicherung zum Schutz vor hohen Zugkräften vorgesehen werden. Die nominelle Bruchfestigkeit bis zu 300 % der Nennlast läßt sich dagegen durch den Einsatz von überdimensionierten Wägezellen durchaus gewährleisten.

Als äußerst robust erwiesen sich die DMS-Direktapplikationen sowohl an der Deichsel wie auch an den Achsen. Obwohl keine mechanischen Schutzmaßnahmen getroffen wurden, traten an keinem der Fahrzeuge im mehr als fünfjährigen Einsatz Störungen auf. Die Grenze der Überlastfestigkeit wird auch im schwierigsten landwirtschaftlichen Einsatz erst überschritten, wenn es zur Deformation des Bauteils kommt. Somit ist bei einer DMS-Direktapplikation die Funktionssicherheit für den ldw. Einsatz gewährleistet. Diese Feststellung entspricht auch den Erfahrungen aus der Industrie [34], wonach DMS-Applikationen bei entsprechenden Schutzmaßnahmen eine große Langzeitstabilität besitzen.

Demgegenüber zeigten sich die Dehnungsaufnehmer, die prinzipiell für die Aufnahme von reinen Zug- oder Druckspannungen konzipiert sind, besonders anfällig für die im praktischen Einsatz auftretenden Stoßbelastungen. An der Deichsel führte dies bei den hohen dynamischen Biegebelastungen nach etwa einjähriger Nutzung zum Ausfall von zwei Dehnungsaufnehmern vom Typ Microcell. Die Ursache dürfte in der Verwendung von Halbleiter-DMS liegen und besonders durch Stoßbelastungen hervorgerufen werden. Darüberhinaus ergaben sich bei den Dehnungsaufnehmern Schwierigkeiten beim Schutz der Sensoren vor schädlichen Umwelteinflüssen. Besonders die herstellerseitig angebrachte Abdeckung der Sensoren erwies sich als nicht ausreichend.

8.2 Rechtliche Anforderungen

Die Hersteller von Kraftfahrzeugen und Anhängern, die am öffentlichen Verkehr teilnehmen, müssen die vom Gesetzgeber in der Straßenverkehrszulassungsordnung festgelegten Bedingungen erfüllen. Bei Änderungen am Fahrzeug muß der Nachweis erbracht werden, daß damit die Verkehrstüchtigkeit nicht beeinträchtigt wird. Insbesondere müssen spezielle Aufbauten und Zusatzeinrichtungen an Fahrzeugen vom zuständigen Technischen Überwachungsverein (TÜV) abgenommen werden. Der TÜV verlangt in diesem Fall vom Hersteller den Nachweis, daß der Fahrzeugaufbau bei einer Konstruktionsänderung oder einem zusätzlichen Einbau von Verbindungselementen für die am Fahrzeug auftretenden statischen (Lasten) und dynamischen (Brems- und Beschleunigungskräfte) Kräfte ausgelegt ist.

Der Einsatz von elastostatischen Wägezellen an der Achse ist nach Aussage des TÜV [*] als kritisch zu beurteilen und Bedarf einer genauen Berechnung in Abhängigkeit vom Fahrzeug. Bei der Verwendung eines Doppelrahmens mit korrekt dimensionierten Wägezellen ist der Nachweis dagegen einfach zu erbringen und wird vom TÜV entsprechend akzeptiert.

Querschnittsänderungen an der Achse oder der Deichsel zur Erhöhung der Empfindlichkeit und damit der Genauigkeit müssen ebenfalls vom TÜV untersucht und abgenommen werden. Auch hier ist der Stabilitätsnachweis und damit die Freigabe des Herstellers erforderlich. Dieser Nachweis ist aber ohnehin für die Dimensionierung des Querschnittes und die Applikation der DMS notwendig.

Keinerlei Bedenken durch den TÜV bestehen bei der DMS-Direktapplikation ohne Bauteilabschwächung und bei der Verwendung von Dehnungsaufnehmern.

Bereits zu Beginn dieser Arbeit wurde darauf hingewiesen, daß die untersuchten Wiegemöglichkeiten in ldw. Ernte- und Transport-

* persönliche Aussage

fahrzeugen nicht eichfähige Systeme im Sinne des Gesetzgebers sind. Zur Erlangung der Eichfähigkeit, die technisch im Prinzip möglich wäre, ist eine Bauartzulassung und damit eine umfangreiche Untersuchung des gesamten Systems durch die Physikalisch Technische Bundesanstalt in Braunschweig erforderlich. Durch die enormen Kosten (bis 50 000 DM) ist dies wirtschaftlich nicht relevant und für den vorgesehenen Einsatz nicht notwendig. Der Besitzer eines Fahrzeuges mit Wiegeeinrichtung darf allerdings diese weder zum Abrechnen von Gütern noch von Leistungen verwenden.

8.3 Aufrüstbarkeit, Nachrüstbarkeit und Kapitalbedarf

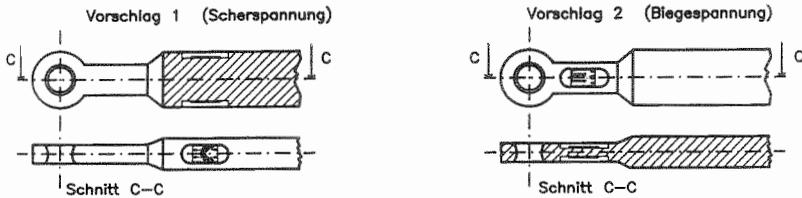
Die drei untersuchten Sensorsysteme bieten bedingt durch ihre Applikationsform unterschiedliche Möglichkeiten ihres Einsatzes und einer eventuellen Nachrüstbarkeit in landwirtschaftlichen Transportfahrzeugen.

Fertig konfektionierte Wägezellen besitzen den Vorteil, daß sie nachträglich nicht mehr abgeglichen werden müssen. Auch der Einbau stellt keine besonderen Ansprüche. Wirtschaftlich ist es jedoch günstiger, die Anbauteile am Fahrzeug an die Wägezellen anzupassen als umgekehrt. Solche mechanischen Änderungen und ein konstruktiver Überlastschutz müssen in der Regel für jedes Fahrzeug spezifisch gestaltet werden. Dies läßt sich wiederum wirtschaftlich eher beim Fahrzeughersteller realisieren. Er kann die erforderlichen Anpassungen bereits bei der Planung des Fahrzeugs kostengünstig einbeziehen. Zur Optimierung der Genauigkeit sollte bei Fahrzeugneukonstruktionen allerdings der prinzipielle Einsatz von Wägezellen berücksichtigt werden. Wie bei modernen Futtermischwagen [28] könnte die Gestaltung des Fahrzeugrahmens hinsichtlich der Verringerung von Nebenkräften optimiert werden. Damit könnte diese Technik bei der Neuausrüstung technisch besser realisiert und konzeptionell für eine Nachrüstung ausgelegt werden.

Die **DMS-Applikation** läßt sich prinzipiell an fast allen Bauteilen durchführen. Für die Erzielung hoher Genauigkeiten sind allerdings

einige bauliche Anforderungen zu gewährleisten. An der Fahrzeugachse muß genügend Abstand zwischen dem Rad und der Achsbefestigung am Rahmen vorhanden sein, damit definierte Scherspannungsverhältnisse bestehen. Weiterhin sollten die applizierbaren Bauteile einen geringen Querschnitt aufweisen, um damit eine möglichst große Dehnung bei der Belastung zu erreichen (Abb. 54).

Universelles Deichselstück für Ein- und Tandemachsfahrzeuge



DMS-Anordnung an Fahrzeugachsen (Scherspannung)

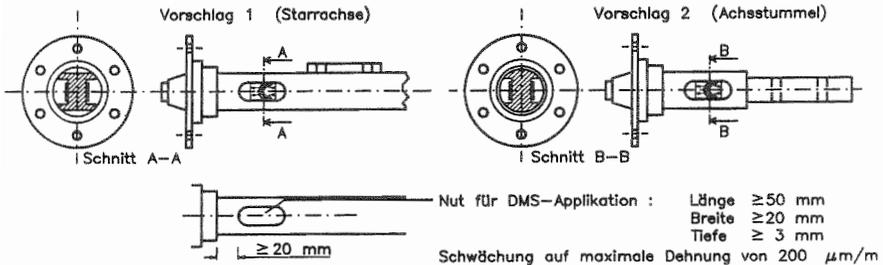


Abbildung 54: Vorschläge für industriell anzubringende Schwächungen an Achse und Deichsel für die Applikation von DMS.

Als Faustzahl sind folgende Größen anzunehmen:

Mindestabstand : Bauteilhöhe * 2

Dehnung bei Nennlast : ca. 0,2 mm/m

Bei Verwendung der Größen "Nennlast, Bauteilform, Geometrie und Elastizitätsmodul des Materials" läßt sich daraus der optimale Querschnitt berechnen.

Diese beiden Anforderungen lassen sich bei Neufahrzeugen ohne größere Schwierigkeiten verwirklichen. Bei Gebrauchtfahrzeugen sind diese Voraussetzungen nicht immer zu erfüllen. Generell

erfordert der Einsatz dieser Technik die Applikation und den Abgleich der unterschiedlichen Meßstellen durch einen Spezialisten. Unter diesen Umständen eignet sich die DMS-Applikation wesentlich besser für die Ausrüstung von Neufahrzeugen als für die Nachrüstung in gebrauchten Fahrzeugen.

Dagegen würde sich für die Nachrüstung der Austausch des jeweiligen Bauteils gegen ein bereits fertig appliziertes anbieten. So könnten die Achsstummel und das Deichselstück bei der Rundballenpresse bereits kalibriert und einbaufertig als Ersatzteil geliefert werden. In gleicher Weise könnte mit Achsen verfahren werden.

Der Einsatz von **Dehnungsaufnehmern** eignet sich dagegen für beide Fälle. Die Anbringung und der Schutz von Dehnungsaufnehmern läßt sich mit etwas Geschick auch vom Landwirt selbst durchführen. Der Abgleich von unterschiedlichen Meßstellen erfordert dagegen einen höheren Aufwand. Zu diesem Zweck muß als Referenz eine separate Wiegeeinheit (Rad-, Achslast- oder Brückenwaage, bzw. Zuglastwaage) zur Verfügung stehen. Damit wäre insbesondere die Nachrüstung dieser Technik mit relativ einfachen Mitteln möglich.

Der **Kapitalbedarf** der einzelnen Techniken liegt in Abhängigkeit vom Sensor und den zugehörigen Systemkosten zwischen 550 und 1600 DM (Tab. 17). Hier wurden die in den Versuchen entstandenen Preise für den Einsatz der Wiegetechnik als Berechnungsgrundlage herangezogen. Für die aufgewendete Arbeit wurde vereinfacht ein Lohnansatz von DM 100 pro Stunde berechnet. Der Kapitalbedarf bezieht sich jeweils auf eine Applikationsstelle, einen Sensor und eine Elektronik zur Aufbereitung und Anzeige des Signals.

Tabelle 18: Kalkulierter Verkaufspreis für ein integriertes Wägesystem in einem Tandemachs-Ladewagen.

System	DMS-Direkt-applikation	Dehnungs-aufnehmer	Wägezellen für Fahrzeug und Anhängerkupplung
Applikationsart	Scherspannung	Biegespannung	Druckspannung
Sensoren (Anzahl)	250,- DM (5)	2 400,- DM (3)	4 000,- DM (4) 1 600,- DM (AHK)
Applikation	2 500,- DM	450,- DM	400,- DM
Bauliche Änderungen	00,- DM	00,- DM	2 000,- DM
Elektronik	600,- DM	600,- DM	400,- DM
Unternehmergewinn 30 %	1 005,- DM	1 035,- DM	2 520,- DM
Gesamtpreis	4 355,- DM	4 485,- DM	10 920,- DM

Tabelle 19: Kalkulierter Verkaufspreis für ein integriertes Wägesystem in einer Rundballenpresse.

System	DMS-Direkt-applikation	Dehnungs-aufnehmer	Wägezellen für Fahrzeug und Anhängerkupplung
Applikationsart	Scherspannung	Biegespannung	Druckspannung
Sensoren (Anzahl)	150,- DM (3)	2 400,- DM (3)	2 000,- DM (2) 1 600,- DM (AHK)
Applikation	1 500,- DM	450,- DM	200,- DM
Bauliche Änderungen	00,- DM	00,- DM	1 000,- DM
Elektronik	600,- DM	600,- DM	400,- DM
Unternehmergewinn 30 %	675,- DM	1 035,- DM	1 560,- DM
Gesamtpreis	2 925,- DM	4 485,- DM	6 760,- DM

8.4 Verfahrenstechnische Einordnung

Ausgehend von den vorgenannten Ergebnissen bietet der Einsatz von Wiegetechnik in ldw. Transport- und Erntefahrzeugen einige entscheidende verfahrenstechnische Vorteile, deren Umsetzung zukünftig einen entscheidenden Einfluß auf eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Landwirtschaft haben könnte.

Der Einsatz von mobilen Agrarcomputern mit einer Schnittstelle zum Betriebs-PC findet immer mehr Eingang in die Praxis. Einer der Gründe ist sicherlich der zunehmende System Einsatz dieser Technik. Von der Datenerfassung und der Datenauswertung über die anschließende Maschinensteuerung bildet sich immer mehr ein geschlossenes System. Beschleunigt wird diese Entwicklung durch den zukünftigen Einsatz des landwirtschaftlichen Bus-Systems. Die genormte Architektur des verwendeten CAN-Bus erlaubt die kostengünstige Kombination unterschiedlicher elektronischer Komponenten von verschiedenen Herstellern.

Die Akzeptanz hängt letztendlich von der Vollständigkeit und dem Automatisierungsgrad dieser Systeme ab. Während die Arbeitsdatenerfassung (Zeit, Weg, Fläche, Stückzahlen), die Datenauswertung und die Maschinensteuerung technisch bereits sehr weit entwickelt sind, bildet die Erfassung der Massenströme (Ertrags- und Aufwandmengen) immer noch ein Kernproblem.

Zur Lösung dieser Aufgabe bietet die Wiegetechnik die technisch umfangreichsten und wirtschaftlichsten Möglichkeiten. Dies wurde im industriellen Einsatz tausendfach bestätigt. Allerdings sind für die Erfüllung dieser Aufgabe stationäre Brücken- oder Achslastwaagen nur teilweise geeignet. Um die mobilen Möglichkeiten auszuschöpfen, die sich durch den Einsatz von Agrarcomputern ergeben, muß auch der Einsatz der Wiegetechnik in mobiler Form erfolgen. Dafür sprechen folgende entscheidende Kriterien:

1. Einsparung von Arbeitszeit,
2. geringere Kosten,
3. Bezug zur kleinen Teilfläche und

4. direkte Kopplung mit einem mobilen Agrarcomputer oder dem landwirtschaftlichen Bus-System LBS und Datenübertragung zum Betriebs-PC.

8.4.1 Arbeitszeit

Der zusätzliche Arbeitszeitbedarf auf einer stationären Waage begründet sich hauptsächlich aus der Anfahrtszeit und der eigentlichen Wiegezeit. Eine Berechnung für diese Größe ist erst nach Vorgabe der von Betrieb zu Betrieb unterschiedlichen Parameter [5] möglich. Diese sind z.B. Schlagentfernung, Fruchtart, Ernteverfahren, Erntemenge, eingesetzte Technik, u.s.w.. Im Gegensatz zum Bordcomputer bieten stationäre Waagen in der Landwirtschaft jedoch nur selten eine PC-Ankopplung.

In der Tabelle 20 sind beispielhaft die Berechnungen für 2 unterschiedliche Ernteverfahren durchgeführt. Demnach muß im günstigsten Fall beim Heuernteverfahren pro Jahr mit einem Zeitaufwand von ca. 23 AKmin je Hektar gerechnet werden. Demgegenüber wäre für die Anwelksilage ein zusätzlicher Arbeitszeitaufwand von 680 AKmin/ha und Jahr aufzuzeigen. Dies steht aber in keinem Verhältnis zum Nutzen und ist deshalb für jeden Praktiker indiskutabel.

Somit bietet sich als Lösung nur die integrierte Wiegetechnik in Verbindung mit mobiler Elektronik und Datenübertragung bzw. Chipkarte an.

Tabelle 20: Arbeitszeitbedarf bei der Ertragsermittlung mit stationären Waagen [5].

Ernteverfahren	Heuernte	Grassilage
Erntefahrzeug	Ladewagen / 8 to Tandemachse	Rundballenpresse 1,2 m
Transportfahrzeug	Ladewagen / 8 to Tandemachse	Frontladerschlepper 40 km/h
Wiegeeinheit	Achslastwaage 15 to mit PC - Anbindung	Fuhrwerkswaage 40 to ohne PC - Anbindung
Fahren pro ha und Schnitt	3	15
Schnitte pro Jahr	3	4
Erntemenge pro ha und Jahr (dt/ha)	150	400
zusätzl. Fahrstrecke/Fuhre (m)	50	1000
zusätzl. Fahrzeit/Fuhre (AKmin)	2	10
zusätzl. Fahrzeit /ha/Jahr (AKmin)	18	600
Verweilzeit an Waage (AKmin)	9 * 0,5 = 4,5	60 * 1 = 60
Zeit für Datentransfer auf PC (AKmin)	0	20
Gesamtzeit pro ha (AKmin)	23,5	680

8.4.2 Verfahrenskosten

Hinsichtlich einer Kostenanalyse ist es schwierig, den monetären Nutzen der Gewichtsermittlung zu erfassen. An dieser Stelle soll aber ein Vergleich zwischen stationären und mobilen, integrierten Wiegetechniken vorgenommen werden. In der Tabelle 21 stehen sich Brücken- bzw. Achslastwaage und Ladewagen mit Wägezellen bzw. Rundballenpresse mit DMS-Applikation als Berechnungsgrundlage gegenüber. Bei den stationären Waagen wurden günstige Anschaffungs- und Baukosten unterstellt. Bei den mobilen Systemen wurde auf frühere Kalkulationen zurückgegriffen.

Danach erfordert das geeichte System mit 7250 DM/Jahr die höchsten Kosten. Verzicht auf Eichung senkt diese Kosten auf etwa ein Drittel. Die mobilen Systeme verursachen unter den getroffenen Annahmen von 1000 Wägungen pro Jahr bis zu 400 DM pro ha niedrigere Kosten. Obwohl die stationären Waagen durch ihre vielseitigen Einsatzmöglichkeiten auf einem Betrieb für die Verwiegung

unterschiedlichster Güter eingesetzt werden können und damit viele Wägungen pro Jahr erlauben, liegt der Vorteil der integrierten Wägetechniken im ortsungebundenen, überbetrieblichen Einsatz. Dadurch lassen sich die Anzahl der jährlichen Wägungen stark erhöhen und entsprechend die anteiligen Kosten sehr stark reduzieren. Lohnunternehmer pressen z. B. mit einer Rundballenpresse ca. 3000 bis 5000 Ballen im Jahr und übertreffen die unterstellten 1000 Wägungen damit bei weitem.

Tabelle 21: Kostenvergleich bei unterschiedlichen Wiegesystemen.

Fahrzeug			Erntewagen Tandem 8 t	Rundballenpresse variabel 0,9-1,8 m
Wiegesystem	Brückenwaage 40 t (geeicht)	Achslastwaage 15 t (ungeeicht)	4 Wägezellen + Anhängekupplung	3 * DMS-Direktap- plikation
Neupreis (Wiegeeintr.)	50 000,-	20 000,-	10 920,-	2 925,-
Abschreibung %	7	7	10	10
Zinsansatz %	7	7	7	7
Reparatur %	2	2	2	2
Eichkosten %	2	-	-	-
jährliche Kosten (DM)	7 250,-	2 500,-	1 693,-	453,-
Ein Wiegevorgang kostet				
bei 100 Wägungen/Jahr	72,5 DM	25,0 DM	16,9 DM	4,5 DM
bei 500 Wägungen/Jahr	14,5 DM	5,0 DM	3,4 DM	0,9 DM
bei 1000 Wägungen/Jahr	7,2 DM	2,5 DM	1,7 DM	0,45 DM
Mehrkosten bei der Wiegung von einem ha pro Jahr				
(angenommen: 1000 Wägungen/Jahr mit dieser Wiegeeinheit)				
im Vergleich zum Ladewagen (Heu)	9 * 5,5 = 49,5 DM/ha,a	9 * 0,8 = 7,2 DM/ha,a		
im Vergleich zur Rundballenpresse (Gras- silage)	60 * 6,75 = 405, DM/ha,a	60 * 2,05 = 123, DM/ha,a		

Auch in diesem Beispiel zeigt sich wiederum der wirtschaftliche Vorteil der preisgünstigen DMS-Direktapplikation gegenüber den anderen mobilen Systemen.

8.4.3 Teilflächenbezug

Die statische mobile Verwiegung der einzelnen Fahrzeugladungen läßt bereits einen Bezug zu Teilflächen zu. Zukünftig läßt sich die angestrebte partielle Ertragsermittlung auf kleinen Teil-schlägen (500 m²), aufbauend auf den gewonnenen Ergebnissen, weiter optimieren. In Verbindung mit bereits praxisreifen Ortungssystemen stellt auch hier die Bordelektronik ein wichtiges Bindeglied zwischen der Erfassung der Daten und der Übermittlung auf den Betriebsrechner dar. Auf diesem steht eine wesentlich höhere und wirtschaftlich günstigere Rechnerleistung für die Datenauswertung im "postprocessing Verfahren" zur Verfügung. Auch die benötigte Software für die Datenanalyse und die Verknüpfung mit Positionsdaten ist verfügbar.

8.4.4 Datenverarbeitung

Die bereits mehrmals erwähnte direkte Kopplung mit mobilen Bordrechnern und dem Datentransfer über Chipkarten erlaubt die Verringerung des Leistungsumfanges der Wiegeelektronik. Dadurch werden sowohl Kosten als auch Entwicklungsaufwand gespart. Insbesondere die Übernahme der Daten auf elektronische Acker-schlagkarteien und die nachfolgende Auswertung sind damit bereits gelöst.

Durch die praktische Einführung des landwirtschaftlichen Bus-Systems (LBS) [4] ist in Verbindung mit dem Bordcomputer als dem zentralen Rechner auf dem Schlepper mit weiteren wirtschaftlichen, aber auch technischen Vorteilen der mobilen Wiegesysteme in ldw. Fahrzeugen zu rechnen.

8.5 Zusammenfassende Betrachtung

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß in landwirtschaftlichen Fahrzeugen die Gewichtsermittlung mit Hilfe von Wiegesensoren möglich ist. Insbesondere die DMS-Sensorik bietet hinsichtlich der Genauigkeit, Robustheit und der Wirtschaftlichkeit die besten Voraussetzungen für statische Wiegunen. In diesem Zusammenhang wäre es sinnvoll, daß bei einer Integration der Wiegetechnik bereits die Hersteller der Fahrzeugkomponenten die technischen Details für die Applikation der Sensoren vorsehen und serienmäßig anbieten. So könnten die Fahrzeugachsen mit Fräsungen für eine DMS-Applikation ausgestattet werden. Auf diesem Wege ließe sich der Kapitalbedarf für den Einsatz der Wiegetechnik erheblich reduzieren.

Hingegen bereitet die dynamische Gewichtsermittlung noch größere Schwierigkeiten. Dabei könnte jedoch die technische Umsetzung der hier gewonnenen theoretischen Erkenntnisse durch landtechnische Maschinenbauer zu einer Verbesserung führen. Ein Ansatzpunkt wäre die Berücksichtigung der Wiegetechnik bei der Konstruktion von Neufahrzeugen. Zum Beispiel könnten durch eine Doppelrahmenbauweise mit einer entsprechenden Sensorik und mit mechanischen Dämpfungselementen die durch die Fahrt hervorgerufenen Störkräfte verringert werden.

8.6 Weiterführende Arbeiten

Zudem müssen weiterführende Arbeiten die untersuchten Ansätze der dynamischen Gewichtsermittlung vertiefen und durch den Einsatz von künftig verfügbaren schnelleren Datenerfassungssystemen ergänzen. In diesem Zusammenhang könnte die gleichzeitige Untersuchung der Beschleunigungskräfte mit mehreren Sensoren am Fahrzeug neue Erkenntnisse für eine optimale Abtastung der Gewichtssignale liefern.

Aber auch durch die Fülle der zukünftig anfallenden Datenmengen entstehen neue Aufgaben. Dafür müssen zuerst neue Methoden für die automatisierte Datenerfassung und die Übergabe an den PC unter-

sucht werden. Bestehende EDV-Programme sind für die Auswertung der dynamischen Daten (Futterberechnungen, Ertragsermittlung pro Schlag, Teilschlagkartierung, usw.) anzupassen. In diesem Zusammenhang ist auch der Pflanzenbauer und die Pflanzenernährung gefordert; Vorgaben für die auf diesen Daten basierenden Berechnungen zur Düngerausbringung sind zu erarbeiten.

Für die angestrebte lokale Ertragsermittlung müssen darüberhinaus weitere Gesichtspunkte erörtert und wichtige Probleme gelöst werden.

Sowohl Grüngut als auch Heu oder Silage bestehen nur zum Teil aus Trockensubstanz. Ein mehr oder weniger großer Teil dieser Produkte besteht aus Wasser. Dieser Anteil kann in weiten Bereichen von Produkt zu Produkt aber auch von Tag zu Tag und vor allem von Ort zu Ort schwanken. Über die gravimetrische Gewichtsermittlung wird immer die Summe aus Trockensubstanz und Wasser erfaßt. Für die Ertragsermittlung ist jedoch ausschließlich die Trockenmasse relevant. Zur Bestimmung dieser Trockenmasse sind unterschiedliche Methoden möglich.

Die wohl einfachste Möglichkeit bietet die rechnergestützte Schätzung des Trockensubstanzanteils mit Hilfe von Erfahrungswerten über die Fruchtart, den Reifegrad, den Bodenzustand, die Witterung usw. und mit Hilfe von Witterungsdaten von Wetterstationen. Dieser einfache Weg wird natürlich nur sehr grobe Werte liefern können.

Eine weitere Möglichkeit besteht in der zur Zeit wohl am häufigsten bei landwirtschaftlichem Grüngut angewendeten Methode der Trockensubstanzbestimmung. Bei diesen absätzigen Verfahren werden mehrere Proben gezogen und anschließend im Trockenschrank getrocknet. Aus der Differenz zwischen Grüngewicht und Trockengewicht läßt sich der Feuchtegehalt bestimmen. Abhängig von der Anzahl der gezogenen Proben kann mit entsprechender Genauigkeit der Trockensubstanzgehalt der geernteten Menge festgestellt werden. Dieses Verfahren besitzt jedoch ähnlich wie die stationären Wiegesysteme den großen Nachteil, daß der Arbeitsablauf erheblich gestört und damit die Verfahrensleistung verringert

wird.

Somit muß für eine lokale Ermittlung des Feuchtegehaltes ebenfalls eine Online-Sensorik zur Verfügung gestellt werden. Dazu bieten sich wiederum verschiedene Möglichkeiten aus dem industriellen Bereich. Stellvertretend für die Vielzahl von berührungslos arbeitenden Absolutfeuchte-meßsystemen sollen die Messung der Dielektrizitätskonstante, die Nahinfrarotspektroskopie und die radiometrischen Verfahren genannt werden. Über deren Einsatzmöglichkeiten in der Landwirtschaft müssen weiterführende Untersuchungen Aufschluß geben.

Schließlich müssen als eine weitere unabdingbare Größe für eine lokale Ertragsermittlung die Positionsdaten des Erntefahrzeuges gewonnen werden. Wie die jüngsten umfangreichen Untersuchungen von AUERNHAMMER et al. [70] beweisen, können diese Daten über unterschiedliche Verfahren der Satellitenortung oder auch mit Hilfe der Wegstreckenmessung über eine Koppelortung mit hoher Genauigkeit online erfaßt werden. Auch an dieser Stelle ist die Automatisierung der Datenerfassung und die Übergabe an den PC eine unabdingbare Grundvoraussetzung.

Letztlich ist jedoch nach den bereits bestehenden Möglichkeiten der Ertragsermittlung im Mähdrescher und in Futtererntemaschinen in Zukunft das Augenmerk auch auf die Ernte weiterer Marktfrüchte zu lenken. Hier kommen insbesondere die Zuckerrübenroder und die Kartoffelvollernter in Frage. Aber auch bei der Ausbringung von anorganischen (Dünger, Kalk) und organischen (Mist, Kompost, Klärschlamm) Düngemitteln sind zusätzliche Impulse für die Kontrolle und Anpassung der Güterströme nötig.

9. Zusammenfassung

In der Pflanzenproduktion wird seit etwa 15 Jahren Elektronik in zunehmendem Maße eingesetzt. Ausgehend von Spritzcomputern in der Außenwirtschaft und Schlagkarteien in der Betriebsführung wurden universelle Steuerungs- und Regelungscomputer mit Datentransfer zum Betriebs-PC entwickelt. Deren Einsatz erfolgt vor allem bei den Verteilarbeiten und bei der Überwachung komplexer Maschinen wie dem Mähdrescher und dem Feldhäcksler.

Mit der Ertragsermittlung im Mähdrescher und der Satellitenortung eröffnete sich in jüngerer Vergangenheit ein neuer Aufgabenbereich der Agrarelektronik. Erstmals können damit die lokalen Gegebenheiten erfaßt und in die Betriebsführung eingebunden werden. Alleine auf den Mähdrusch bezogen stellen sie jedoch eine Insellösung im landwirtschaftlichen Betrieb dar. Deshalb sind diese ersten Ansätze einer innerbetrieblichen Massen- und Güterstromerfassung und -überwachung auf die anderen Feldfrüchte und auf den flächenmäßig sehr gewichtigen Futterbau auszudehnen.

Zur Masse- bzw. Ertragsermittlung werden im Mähdrescher bisher indirekte und direkte Meßmethoden eingesetzt. Offene und geschlossene volumetrische Meßverfahren ermöglichen über die Dichte des Erntegutes einen Rückschluß auf die Masse. Radiometrische Meßverfahren und Verfahren mit Prallplatte lassen dagegen eine direkte Massenermittlung zu. Beide Verfahren setzen jedoch voraus, daß das Meßgut im Hinblick auf die Dichte und auf die Feuchtigkeit eine hohe Homogenität besitzt.

Für die Futterernte scheiden diese Meßprinzipien aus. Dafür bieten konventionelle Wiegesysteme günstigere Voraussetzungen. Wird eine Gesamtertragsermittlung angestrebt, dann können dafür stationäre Brücken-, Achslast- oder Radlastwaagen eingesetzt werden. Deren Technik ist bewährt und aufgrund des ortsfesten Einsatzes wenig störanfällig. Allerdings besitzen diese Systeme verfahrenstechnisch unübersehbare Nachteile:

- Sie müssen zur Gewichtsermittlung angefahren werden, stören damit den Arbeitsablauf und verringern die Verfahrensleistung.

- Sie ermöglichen keine direkte Einbeziehung in eine laufende Maschinenüberwachung oder -steuerung.
- Sie erlauben keinen Bezug zur kleinen Teilfläche.

Demgegenüber stellen Wiegeeinrichtungen in Futtermischwägen und Wiegerahmen im Schlepperheck zwischen Dreipunktgestänge und Anbaudüngerstreuer erste gute Ansätze für eine mobile Gewichtsermittlung dar. Aufgrund des hohen Preises, zusätzlichen Gewichtes und der Verlagerung des Schwerpunktabstandes (Wiegerahmen) konnten diese Systeme bisher jedoch nur einen begrenzten Eingang in die landwirtschaftliche Praxis finden.

Aus diesen Gründen sollte die vorliegende Arbeit die Möglichkeiten einer Integration der Gewichtsermittlung in Futtererntemaschinen und Transportfahrzeugen untersuchen. Dazu wurden der Ladewagen und die Rundballenpresse als primäre Erntegeräte im Futterbau sowie der Kipper als universelles Transportfahrzeug ausgewählt. Für diese Maschinen und Fahrzeuge sollte eine zweistufige Lösung erarbeitet werden:

1. In einem ersten Teilziel war die Realisierung der absätzigen, statischen Gewichtsermittlung in den einzelnen Fahrzeugen vorgesehen.
2. In einem zweiten Teilziel sollte dann geprüft werden, inwieweit mit diesen Techniken eine dynamische Ertragsermittlung durch kontinuierliches Wiegen während des Ladens möglich ist.

Für beide Teilziele wurden folgende Anforderungen definiert:

- **Ausreichende Genauigkeit für statische Wiegunen** ($\pm 2\%$ vom aktuellen Gewichtswert (95 %-Vertrauensbereich)),
- **niedrige Kosten,**
- **hohe Robustheit** für den landwirtschaftlichen Einsatz,
- **Nachrüstbarkeit** für bereits eingesetzte Fahrzeuge.

Als universelles Sensorelement wurde die Dehnungsmeßstreifen-technik ausgewählt. Sie kam in den Formen der Direktapplikation, als Dehnungsaufnehmer oder als fertig konfektionierte Wägezelle zum Einsatz. Entsprechend dem Einbau- oder Applikationsort bzw. der Integration ließen sich damit Spannungs- und Belastungsfälle in Form der Zug-/Druckspannung, der Biegespannung und der Scherspannung erfassen.

Die entsprechenden Applikationsstellen müssen so festgelegt werden, daß das gesamte Ladegewicht durch die hervorgerufenen Spannungen möglichst genau ohne Einwirkung von Störgrößen ermittelt werden kann. Für die Erfassung der **Druckspannung** in den untersuchten Fahrzeugen bietet sich besonders der Einsatz von Wägezellen an den Achsen und deren Verbindungselementen und in der Anhängerkupplung an. Die **Biegespannung** an der Deichsel ist dagegen vorteilhafter mit DMS oder Dehnungsaufnehmern abzunehmen. Bei der **Scherspannung** an den Fahrzeugachsen, aber auch an der Deichsel, bietet sich die DMS-Direktapplikation an.

Für die Versuche zur statischen Gewichtsermittlung wurden zwei Ladewagen als Einachs- und Tandemachsfahrzeug, ein zweiachsiger Kipper und eine Rundballenpresse verwendet. Entsprechend den möglichen Einbauorten wurden drei unterschiedliche Meßsysteme eingesetzt:

- **Messung der Biegespannung** an Achse und Deichsel mit DMS und Dehnungsaufnehmern.
- **Messung der Scherspannung** an der Achse mit DMS.
- **Messung der Druckspannung** an der Achse und in der Anhängerkupplung mit Druckkraftwägezellen.

Bei den statischen Versuchen wurden die Fahrzeuge mit den Wiegesystemen jeweils mit 4 Wiederholungen bis zu einer Last von 3000 kg be- und entlastet. Die Lastveränderung erfolgte in Schritten von 30 kg. In gleicher Weise wurde die modifizierte Anhängerkupplung bis 1200 kg be- und entlastet.

Die Ergebnisse der statischen Untersuchungen zeigten, daß mit zwei Systemen sehr hohe Genauigkeiten erreichbar sind:

- **Direktapplikation von DMS** zur Erfassung der Scherspannung in der Achse und der Biegespannung in der Deichsel.
- **Einsatz von modifizierten Kraftaufnehmern** (Wägezellen) zwischen Achse und Rahmen und in der Anhängerkupplung.

Eine fachgerechten Montage vorausgesetzt ermöglichen diese Systeme Meßfehler kleiner 1 %; sie erfüllen damit die gestellten Anforderungen. In der Praxis ließe sich dieses Ergebnis durch die Erfassung der Scherspannung anstelle der Biegespannung an der

Deichsel noch verbessern.

Der Einsatz von Dehnungsaufnehmern zur Erfassung der Biegespannung erwies sich dagegen als ungünstig. Zum einen ließ die Temperaturempfindlichkeit und die mangelnde Robustheit der teuren Aufnehmer zu wünschen übrig. Zum anderen ergab die Erfassung der Biegespannung vor allem an der Achse eine hohe Hysterese, die auf die Hebelarmabhängigkeit der Biegespannung durch die Auflageränderung zurückzuführen ist.

Die dynamischen Untersuchungen wurden mit einem einachsigen Ladewagen und mit einer Rundballenpresse durchgeführt. Untersucht wurden unterschiedliche Betriebszustände und die auftretenden vertikalen Beschleunigungskräfte. Die Untersuchungen erfolgten in speziellen Meßfahrten und in mehreren Praxiseinsätzen. Bei den Meßfahrten wurden folgende Einflußgrößen verändert:

- Pickup am Boden - Pickup angehoben;
- Maschine eingeschaltet - Maschine ausgeschaltet;
- Last.

Die Erfassung der vertikalen Beschleunigungskräfte erfolgte mit Hilfe eines Beschleunigungssensors an verschiedenen Bauteilen. Die gemessenen Beschleunigungswerte erreichten die 2- bis 3-fache Größe der Gesamtlast. Deren Kompensation wurde durch die direkte Verrechnung mit den Beschleunigungswerten, durch eine digitale Filterung und durch unterschiedliche Ansätze der Mittelwertbildung versucht.

Aus den dynamischen Versuchen können folgende Einzelergebnisse abgeleitet werden:

- Dynamische Meßergebnisse sind weitgehend unabhängig von den unterschiedlichen Sensorapplikationen.
- Auf die einzelnen Fahrzeugteile wirken unterschiedlich hohe vertikale Beschleunigungskräfte bis maximal ± 2 g.
- An der Deichsel wirken höhere Beschleunigungen als an der Achse.
- Eine Verrechnung des dynamischen Gewichtssignals mit den Beschleunigungswerten erbrachte keine optimale Glättung der Gewichtsanzeige, obwohl vor allem an der Achse eine Korrelation von beiden Signalen festzustellen ist.

- Die FFT-Analyse der dynamischen Signale zeigte hohe Amplitudenwerte bei Frequenzen von 2 - 5 Hz und bei 0 Hz. Die Höhe der Amplitudenwerte bei 0 Hz weist auf einen hohen Anteil von nichtperiodischen Signaleinflüssen hin.
- Eine digitale Filterung des Signals ist nur bedingt möglich. Dennoch konnte durch eine Tiefpaßfilterung eine Verringerung der Signalausschläge auf $\pm 15\%$ erreicht werden.
- Nahezu den gleiche Effekt zeigte die Berechnung des gleitenden Mittelwertes.

In der Summe betrachtet bedeuten sie jedoch, daß die untersuchte Technik zur dynamischen Gewichtsermittlung derzeit die an sie gestellten Anforderungen noch nicht erfüllen kann. Deshalb wurde abschließend nur das absätzig mobile Verfahren einer verfahrenstechnischen Einordnung unterzogen. Diese erbrachte folgende Gesamtaussagen:

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der Möglichkeiten der Applikation bietet sich derzeit die DMS - Direktapplikation zur Erfassung der Scherspannung an den Achsen und der Biegespannung an der Deichsel an. Dieses System könnte in der Rundballenpresse für etwa 3000 DM realisiert werden. Damit belaufen sich die Kosten bei einer Leistung von 1000 Ballen im Jahr auf etwa 0,45 DM pro Ballen bzw. auf 6,70 DM pro ha Grassilage. Somit ist dieses Verfahren hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Zeitaufwand den stationären Wiegesystemen (Brückenwaage, Achslastwaage) weit überlegen.

10. Summary

Up to now electronics in agriculture was mainly used for controlling the distribution of fertilizer and chemicals and for the farm management with the PC. With the introduction of systems for local yield measurement in combines new possibilities and challenges are arising. The total onfarm material flow can be registered if yield monitoring is realized for all crops. Especially forage production with its significant spreading has to be taken into consideration.

The carried out investigations are dealing with this area. They are divided into five chapters.

First, possible weighing techniques for agricultural usage are worked out. It can be seen that the number of stationary scales is decreasing. Additionally, these devices can only detect the total yield. Also recent approaches with axle scales and wheel scales do not solve this problems. Their employment is capital- and cost-intensive, they require changes in the transport logistics and weighing becomes a very time consuming procedure.

Therefore it is a logical consequence to investigate the integration of weighing techniques into harvesting machines and transport vehicles. For the detection of the loaded weight 3 different electronic sensors were tested: strain gauges for direct application, strain gauges for screwing on and load cells. Depending from the type of vehicle a corresponding application form is chosen. A two-axle tipper, a single-axle selfloading trailer, a tandem-axle selfloading trailer and a round bailer are used as test vehicles.

In the third part, the static investigations with the selected test vehicles are shown. The results for all vehicles are excellent. Directly applied strain gauges for detecting shear strains in the axle and bending strains in the tongue as well as load cells between the axle and the vehicle frame make it possible to detect the weight with errors less than 1 %. From the view point of process engineering and economy strain gauges in direct application show the highest potential.

The tests for dynamic employment of integrated sensors are described in the fourth chapter. First, the influences of acceleration forces during driving are demonstrated. Next, different mathematical methods for signal conditioning are following. Nevertheless, a error of 15 % remains. The detected acceleration forces are ranging between +/- 2 g.

The concluding analysis from the process engineering viewpoint emphasizes the decisive advantages of integrated techniques:

- reduction of working time,
- low costs,
- relation to small plots and
- direct coupling with a mobile agricultural computer or agricultural bus-system and data transfer to the farm-PC.

Finally, the turned out results are discussed. With it the reached advances become clearly visible compared to current approaches. With the tested techniques systems for local yield measurement can be realized with acceptable costs today. On the other hand additional investigations for the dynamic employment are necessary.

11. Literatur

1. Auernhammer, H. und H. Stanzel: Untersuchungen an Sensoren für Wiegemöglichkeiten in der Schlepperdreipunkt-hydraulik. Kurzfassung der Vorträge "Landtechnik 1987", VDI und MEG in Braunschweig 1987, S. 41-43
2. Auernhammer, H., M. Demmel und H. Stanzel: Wiegemöglichkeiten in der Schlepperdreipunkthydraulik. Landtechnik 43 (1988), H.10, S. 414 - 418
3. Auernhammer, H.: Landtechnische Entwicklungen für eine umwelt- und ertragsorientierte Düngung. Landtechnik 45 (1990), H. 7/8, S. 272 - 278
4. Auernhammer, H.: Elektronik in Traktoren und Maschinen. München: BLV-Verlag 1989
5. Auernhammer, H. und J. Rottmeier: Ermittlung des Arbeitszeitbedarfes auf neuen Wegen. Landtechnik 45 (1990), H. 4, S. 161 - 163
6. Bachmann, R.: Maschinenelemente: Grundlagen und Verbindungselemente. Würzburg: Vogel Verlag 1982
7. Baillie, K.J.: Developments in grain weighing equipment. Workshop on grain handling, Melbourne 6-7 August 1984, Preprints of Papers, S. 14 ff
8. Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Bayerischer Agrarbericht 1992
9. Beitz, W. und K.-H. Küttner: Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1990
10. Bernhardt, K. und W. Recker.: Transportable Meßeinrichtung zur Bestimmung von Rad- und Achslasten. Agrartechnik 28 (1978), Nr. 7, S. 315 - 317
11. Bietry, L. und M. Kochsiek: Praktischer Leitfaden der wägetechnischen Begriffe. Mettler Wägelexikon, Greifensee 1982
12. Böhm, E.: Messen, Steuern, Regeln in der Landtechnik. Würzburg: Vogel Verlag 1988
13. Böhm, E. und J. A. Hansen: Kräfte am Wagen. Agrartechnische Lehrbriefe, Agrartechnik International, Würzburg: Vogel Verlag 1975
14. Bruce, D.M., Smith, R.A. und I.R. Meeks: Mobile feeding equipment: A weighing unit with auto taring and batching. Journal of Agricultural Engineering Research 25 (1980), Nr. 2, S. 155 - 160

15. Bundesminister des Innern: Bodenschutzkonzeption der Bundesregierung. Bundestagsdrucksache 10/2977; Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz 1985
16. Chedda, H.R. und F.O. Aboaba: A mechanical device for continuous harvesting and herbage yield evaluation of tall growing foddergrass. Nigerian Agricultural Journal 10 (1973), Nr. 1, S. 13 - 24
17. Czichos, H.: Hütte - Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1989
18. Erdem, U.: Force and weight measurement. Journal of Physics: Scientific Instruments 15 (1982), Nr. 9, S. 857 - 872
19. Freytag, H.E. und R. Jäger: Zur berührungslosen Massebestimmung von Pflanzenbeständen durch Absorption von Gammastrahlen. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 23 (1979), Nr 12, S. 757 - 764
20. Harasim, A., Müller K. und H.O. Alles: Statik: Grafische Statik und Trägerlehre. Würzburg: Vogel Verlag 1991
21. Hartwig R.O. und T.S. Colvin: Automative weighing and moisture sampling for a field-plot combine. St. Joseph, ASAE-Paper 83-1593
22. Hehn, K. H. und W. Schulz: Brückenschaltung mit DMS zur unmittelbaren Messung der Materialspannung. Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Meßtechnische Briefe 1966, H. 2; S. 18 - 21
23. Hoffmann, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH 1987
24. Hoffmann, K.: Anwendung der Wheatstone Brückenschaltung. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Broschüre VD 72001, 1972
25. Hoffmann, K.: Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung von Meßfehlern beim Messen mit Dehnungsmeßstreifen. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Broschüre VD 78001, 1978
26. Hoffmann, K.: Hinweise zum Applizieren von Dehnungsmeßstreifen. Darmstadt: Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Broschüre VD 84005, 1984
27. Hooper, A.W. und B. Ambler: A combine harvester discharge meter. Journal of Agricultural Engineering Research 24 (1979), Nr. 1, S. 1 - 10
28. Imkampe, W. und H.-G. Pfänder: Futtereintopf direkt vorm Rindermaul. DLZ 43 (1992), H. 9, S. 86 - 93

29. Isermeyer, F.: Extensivieren bis zum Optimum. DLG-Mitteilungen/agrar info 105 (1990), H. 20, S. 55 - 58
30. Jungerberg, H.: Ein Beitrag zur experimentellen und numerischen Simulation von Traktorschwingungen. Fortschrittberichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 14, Nr. 26, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984
31. Kainka, B.: Messen, Steuern, Regeln über die RS-232-Schnittstelle. München: Franzis Verlag 1992
32. Keil, S.: Analyse ebener Spannungszustände mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen. Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Meßtechnische Briefe 8, 1972, H.1, S. 1 - 4
33. Kloth, W.: Über das Messen von Kräften und Spannungen in der Landtechnik. Grundlagen der Landtechnik 3 (1952), S. 129 - 132
34. Kochsiek, M.: Handbuch des Wägens. Braunschweig: Vieweg - Verlag 1989
35. Kreuzer, M.: Digitale Filterfunktionen für das elektrische Messen mechanischer Größen. Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Meßtechnische Briefe 22, 1986, H. 2, S.53 - 61
36. Krist, T.: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Darmstadt: Hoppenstedt Verlag 1989
37. Kutzbach, H.-D.: Allgemeine Grundlagen: Ackerschlepper - Fördertechnik. Sachbuch der Agrartechnik Band 1, Hamburg, Berlin: Verlag Paul Parey 1989
38. Lane, K.: How weigh systems needs led to a usefull pressure transducer. Control and Instrumentation 11 (1979), Nr.1, S.27 ff
39. Lift, H.: Hydraulik in der Landtechnik. Würzburg: Vogel Verlag 1983
40. Meijer, R. und Hvan den Berge: Electronic weighbridges. Science and Industry 16 (1980), S. 13 - 24
41. Mührel, K.: Landwirtschaftliche Transporte und Fördertechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1974, S. 36 - 40
42. N.N.: Kriterien für das dynamische Verhalten von Kraftmeßsystemen (Bestimmung der Eigenfrequenz). Hottinger Baldwin Meßtechnik, Meßtechnische Briefe 2, 1970, H. 1, S. 46 - 47
43. Oheimb, R. von.: Grünfütterernte und Konservierung. KTBL-Schrift Nr. 318, Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. 1987

44. Ort, W.: Sensoren mit Metallfolien-Dehnungsmeßstreifen. Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Meßtechnische Briefe 18, 1982, H. 1, S. 11 - 16
45. Paul, H.: Drücke erfassen. Maschinenmarkt 1989, H. 11, S.46 - 51
46. Pearson, J.G. und P.J. Holligan: Bulk bin weighing machine. New South Wales, Australia: Agricultural Engineering Centre, Technical Report 78/3 (1978), S. 5 ff
47. Potma, T.: Dehnungsmeßstreifen - Meßtechnik. Hamburg: Deutsche Philips GmbH 1968
48. Prussia, S.E. und M. O'Brien: A direct weighing electronic load cell system. St. Joseph, 1980, ASAE-Paper 80-6012, S.13 ff
49. Ratschow, J.-P.: Futterernte mit Ladewagen. DLG - Merkblatt Nr. 215, Frankfurt: Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft 1985
50. Ratschow, J.-P.: Fahrzeugwaagen in der Landwirtschaft. Kiel: Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft RKL, 1990, Sonderdruck
51. Rifai, M.: Beitrag zur technischen Prüfung von landwirtschaftlichen Einachsanhängern. KTL-Bericht 93, Frankfurt 1965
52. Rödel, H.: Technische Mechanik. Würzburg: Vogel Verlag 1977
53. Rohlfing, H. und H. Schmidt: Tabellenbuch Elektrotechnik Elektronik. Bonn: Dümmler Verlag 1989
54. Rottmeier, J.: Ansätze zur Gewichtsermittlung in Transportfahrzeugen. BML-Arbeitstagung '90, KTBL-Arbeitspapier 145, Darmstadt 1990
55. Rottmeier, J., H. Auernhammer und H. Stanzel: Elektronik-einsatz in der Landtechnik zur Verringerung des Düngemittelaufwandes und der Umweltbelastung im Futterbau. Berichte aus dem Institut für Landtechnik, Weihenstephan 1989/1990
56. Sachs, L.: Angewandte Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 1984 (6. Aufl.)
57. Schanz, G. W.: Sensoren - Fühler der Meßtechnik. Heidelberg: Hüthig Verlag 1988
58. Scholtysik, J.B.: Einfluß des zugeführten Massenstroms auf das Dosierergebnis bei Kraftfutter-Dosierwaagen. Grundlagen der Landtechnik 30 (1980), H. 3, S. 61 - 66

59. Schueller, J.K. und Min-Wen Wang: Spatially-variable fertilizer and pesticide application with GPS and DGPS. Computers and Electronics in Agriculture 11 (1994), S. 69 - 83
60. Schulz, D.: PC-gestützte Meß- und Regeltechnik. München: Franzis Verlag 1992
61. Schuster, A.: Industrielle Wägetechnik. Darmstadt: Carl Schenck AG 1983
62. Smith, R.A. und J.R. Dawson: A near-weight Indicator for Mobile Feeding Equipment. Journal of agric. Engineering Research 23 (1978), S. 105-107
63. Spingies, W.: Elektronische Waagen. RKL-Schrift 1981
64. Spinnler, R.: Untersuchungen über Wiegemöglichkeiten in der Schlepperdreipunkthydraulik. Diplomarbeit: Institut für Landtechnik, Weihenstephan 1987
65. Stanzel, H.: Elektronische Radlastmesser. RKL-Schrift 1979, S. 307 - 312
66. Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 1989. Münster-Hiltrup: Landwirtschaftsverlag, 1990
67. Thompson, R.C.: Equipment for weighing a tractor trailer. Proceedings: Sixth International Conference on Mechanization of Field Experiments, Dublin 1984, S. 298 - 300
68. Tränkler, H-R.: Taschenbuch der Meßtechnik. München, Wien: Oldenbourg Verlag 1987
69. VDI-Bericht Nr. 137: Präzisionsmessungen mit Dehnungsmeßstreifen für Kraftmessung und Wägung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1970
70. VDI/MEG Kolloquium Agrartechnik, Heft 14: Ortung und Navigation landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Tagung: Weihenstephan 1992
71. Volkmann, V.C.: Hilfssensoren zur Meßwertkorrektur bei Wägezellen. Technisches Messen TM 53, 1986, H. 7/8, S. 293 - 298
72. Vansichen, R. und J. De Baerdemaker: A measurement technique for yield mapping of corn silage. Tagungsbericht, AgEng 90, Berlin, 24 - 26 Oktober 1990
73. Wendeborn, J.O.: Die Unebenheiten landwirtschaftlicher Fahrbahnen als Schwingungserreger landwirtschaftlicher Fahrzeuge. Grundlagen der Landtechnik 15 (1965), H. 2, S. 33 - 64

74. Wenner, H.-L.: Landtechnik, Bauwesen: Verfahrenstechniken - Arbeit - Gebäude. München: BLV-Verlag 1986 (8. Aufl.), S. 55 - 91
75. Wesley, R.A.: A hydraulic grain weighing system for combines. St. Joseph, 1983, ASAE-Paper Nr. 83-1592
76. Wetzell, O.W.: Elektrisches Messen mechanischer Größen - ein Grundlagenfach des Bauingenieurstudiums. Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Meßtechnische Briefe 22, 1986, H. 2, S. 37 - 40

EDV-Programme

77. ASM: DATALOG Version 1.0 Datenerfassungssoftware, 1990
78. Autodesk: AutoCAD LT Version 1.0 und 2.0, 1994, 1995
79. Gesellschaft für Strukturanalyse GfS: DIA Version 3.0, 1992
80. Lotus Development: Lotus 1-2-3 Version 3.0 und 3.1, 1989, 1995
81. Microsoft: Chart Version 3.0, 1990
82. Real Time Devices: Signal*Math Version 2.0, 1992

Rottmeier

Abbildung	Seite	Nummer	Bemerkung	
1	7	902244	A 4	
2	8			
3	13	912239	A 4	englisch
		902234	A 4	deutsch
		902358	A 4	verändert
4	21			
5	22			
6	25			
7	27	902145	A 3	