

Dipl.-Ing. Thomas Beck, Stuttgart

**Meßverfahren
zur Beurteilung des
Stoffeigenschaftseinflusses
auf die Leistung
der Trennprozesse
im Mähdrescher**

Reihe **14**: Landtechnik/
Lebensmitteltechnik

Nr. **54**

Beck, Thomas

Meßverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 14 Nr. 54. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992.
140 Seiten, 78 Bilder, 6 Tabellen.

Für die Dokumentation: Mähdrescher — Trennen — Trennleistung — Stoffeigenschaften — Meßverfahren — Entmischen — Sortieren — Fluidisierung — Feldversuch

Der bei der Korn/Stroh- und bei der Korn/Spreu-Trennung im Mähdrescher auftretende Kornverlust ist eine stetig wachsende Funktion des Durchsatzes. Die Trennprozeßleistung ist der Massendurchsatz, bei dem ein zulässiger Kornverlust überschritten wird. Parameter der Funktion sind die konstruktive Gestaltung der Trennelemente und die Stoffeigenschaften des Erntegutes. Für denselben Mähdrescher werden deshalb in verschiedenen Jahren oder Feldern unterschiedliche Leistungen festgestellt. Der Einfluß der Stoffeigenschaften muß deshalb quantitativ beurteilt werden. Um den aufwendigen Einsatz eines Vergleichsmähdreschers zu vermeiden, werden wesentlich einfachere und genauere Meßverfahren für Stoffeigenschaften vorgeschlagen. Aus der Analyse der Trennprozesse im Mähdrescher werden zwei Meßverfahren für technologische Stoffeigenschaften hergeleitet. Für die Korn/Stroh-Trennung wird eine Zeitkonstante der Entmischung (Durchdringungszeit) bestimmt, für die Korn/Spreu-Trennung wird die Fluidisierungsgeschwindigkeit des Gutgemisches gemessen. Korrelationen zwischen Änderungen dieser Stoffeigenschaften und Leistungsänderungen der Trennprozesse eines Versuchsmähdreschers werden im Feldversuch experimentell bestätigt.

Die Reihen der FORTSCHRITT-BERICHTE VDI:

- | | |
|--|---|
| 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente | 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik |
| 2 Fertigungstechnik | 13 Fördertechnik |
| 3 Verfahrenstechnik | 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik |
| 4 Bauingenieurwesen | 15 Umwelttechnik |
| 5 Grund- und Werkstoffe | 16 Technik und Wirtschaft |
| 6 Energieerzeugung | 17 Biotechnik |
| 7 Strömungstechnik | 18 Mechanik/Bruchmechanik |
| 8 Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik | 19 Wärmetechnik/Kältetechnik |
| 9 Elektronik | 20 Rechnerunterstützte Verfahren
(CAD, CAM, CAE, CAP, CAQ, CIM, ...) |
| 10 Informatik/Kommunikationstechnik | 21 Elektrotechnik |
| 11 Schwingungstechnik | |

D 93

© VDI-Verlag GmbH · Düsseldorf 1992

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9570

ISBN 3-18-145414-1

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1987 bis 1991 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik des Institutes für Agrartechnik an der Universität Hohenheim.

Die Arbeit wurde von Herrn Prof.Dr.-Ing. H.D. Kutzbach angeregt und wissenschaftlich betreut. Dafür sowie für die stets großzügige Unterstützung des Projektes bedanke ich mich herzlich. Professor Kutzbach hat mir Gelegenheit zu einer sehr selbständigen Bearbeitung des Forschungsprojektes gegeben. Für das damit erwiesene Vertrauen möchte ich mich besonders bedanken.

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

Für die stete Bereitschaft zur kritischen Diskussion und zur Weitergabe von eigenen Erfahrungen bedanke ich mich bei meinen Kollegen am Lehrstuhl, ganz besonders bei Herrn Dr.agr. P. Wacker, von dem ich außerdem viele wertvolle Anregungen zum experimentellen Arbeiten erhalten habe. Allen Mitarbeitern des Lehrstuhles und der zentralen Einrichtungen des Institutes, die mich beim Aufbau der Versuchseinrichtungen und bei der Versuchsauswertung nach Kräften unterstützt haben, möchte ich ebenfalls danken.

Die über drei Jahre hinweg erfolgreich durchgeführten Feldversuche waren nur durch die engagierte und kompetente Mitarbeit der technischen Assistentinnen und der Studenten des Lehrstuhls möglich. Für die Bildung eines schlagkräftigen Versuchsteams möchte ich mich bei ihnen ganz herzlich bedanken. Mein besonderer Dank gilt Frau Brigitte Schuch (LTA). Sie hat mich als Projektassistentin bei allen Versuchen wirkungsvoll unterstützt und mit großer Sorgfalt die graphischen Darstellungen erstellt.

Hohenheim, im November 1991

Thomas Beck

	<u>Inhalt</u>	Seite
	Formelzeichen	7
	Indices	10
1	Einführung	11
2	Einteilung der Stoffeigenschaften	19
3	Bisherige Untersuchungen zum Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Trennprozesse im Mähdrescher	23
4	Theoretische Grundlagen	34
4.1	Überlegungen zur Auswahl der Stoffeigenschaften	34
4.2	Trenneigenschaften	36
4.2.1	Korn/Stroh-Trennung auf dem Hordenschüttler	36
4.2.1.1	Konstruktive Gestaltung des Hordenschüttlers	39
4.2.1.2	Kornströme im Mähdrescher	40
4.2.1.3	Kornabscheide- und Kornrestfunktion	44
4.2.2	Entmischungsversuch	48
4.2.2.1	Einflüsse auf die Korndurchgangsfunktion	53
4.2.2.2	Zusammenhang zwischen Durchdringungszeit und Schüttlerleistung	56
4.3	Durchströmungseigenschaften	58
4.3.1	Fluidisierung	58
4.3.1.1	Berechnungsmöglichkeiten	60
4.3.1.2	Reale Schüttungen	63
4.3.2	Korn/Spreu-Trennung auf der Reinigungsanlage	65
4.3.2.1	Konstruktive Gestaltung der Reinigungsanlage	68
4.3.2.2	Zusammenhang zwischen Fluidisierungsgeschwindigkeit und Reinigungsleistung	71

5	Meßverfahren für technologische Stoffeigenschaften	75
5.1	Entmischungsversuch	75
5.1.1	Aufbau des Durchdringungszeit-Prüfstandes	75
5.1.2	Prüfstandsteuerung und Meßwerterfassung	78
5.1.3	Meßwertverarbeitung	80
5.1.4	Experimentelle Untersuchungen	82
5.2	Fluidisierungsversuch	91
5.2.1	Aufbau des Fluidisierungs-Prüfstandes	91
5.2.2	Prüfstandsteuerung und Meßwerterfassung	93
5.2.3	Meßwertverarbeitung	94
5.2.4	Experimentelle Untersuchungen	97
5.3	Mobiles Labor	103
6	Meßverfahren für die Trennprozeßleistung	105
6.1	Versuchsmähdrescher	105
6.2	Stetige Durchsatz/Verlust-Kennlinie und Trennprozeßleistung	112
7	Ergebnisse der Feldversuche	117
7.1	Schüttlerleistung und Durchdringungszeit	117
7.2	Reinigungsleistung und Fluidisierungsgeschwindigkeit	126
8	Zusammenfassung	130
9	Schrifttum	134

Formelzeichen

A_B	m^2	Behältergrundfläche
A_D	m^2	Querschnittsfläche Einlaufmeßdüse
A_e	m	Erregeramplitude
A_K	m^2	Austrittsfläche Gleichrichterkanal
a	-	Maximalabweichung beim Kolmogoroff-Smirnow-Test
b	m	Breite
c	-	Vergleichszahl beim Kolmogoroff-Smirnow-Test
d_D	m	Durchmesser Einlaufmeßdüse
d_s	m	äquivalenter Teilchendurchmesser
Fr_V	-	Froudezahl (Vertikalbeschleunigungsverhältnis vgl. Γ)
f_e	Hz	Erregerfrequenz
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
h_{Sch}	m	Schütthöhe
k	-	Kornmassenanteil
k_1	-	Laminarkonstante
k_t	-	Turbulenzkonstante
L	-	Länge eines Vertrauensintervalles
l	m	Länge
m	kg	Masse
$\dot{m}$	kg/s	Massendurchsatz
$\dot{m}'$	kg/s·m	auf die Breite des Trennelementes bezogener Massendurchsatz
$\dot{m}'_{(VKzul)}$	kg/ s·m	Trennelementleistung = Massendurchsatz bei zulässigem Kornverlust
$\dot{m}'_{NKB(1\%)}$	kg/ s·m	Schüttlerleistung (NKB-Durchsatz)
$\dot{m}'_{NKB(0,5\%)}$	kg/ s·m	Reinigungsleistung (NKB-Durchsatz)
$\dot{m}'_{K(0,5\%)}$	kg/ s·m	Reinigungsleistung (Korn-Durchsatz)
m^*	kg/m^2	Massenbelegung

n		Anzahl (von Versuchswiederholungen)
Δp	Pa	Differenzdruck, Druckabfall
Δp_{FL}	Pa	Fluidisierungsdruckabfall (Druckabfall bei fluidisierter Schüttung)
Re	-	Reynoldszahl
R	kg/m	Kornrest
r	m	(Kurbel-)radius
S	m	spezifische Teilchenoberfläche
s	-	Standardabweichung einer Stichprobe
s^2	-	Varianz einer Stichprobe
T_i	s	Zeitkonstante
t	s	Zeit
$t_{0,8}$	s	Durchdringungszeit
U	%	mittlerer Gutfeuchtegehalt
$\dot{V}$	m ³ /s	Volumenstrom
V_F	m ³	Hohlraumvolumen einer Feststoffschüttung (Volumenanteil des Fluids)
V_S	m ³	(Fest-)Stoffvolumen einer Schüttung
V_{Sch}	m ³	Schüttvolumen
V_K	%	Kornverlust
v_U	m/s	Umfangsgeschwindigkeit Dreschtrammel
w_S	m/s	(Feststoff-)Fördergeschwindigkeit
w_{FL}	m/s	Fluidisierungsgeschwindigkeit einer Schüttung
$w_{FL(NKB)}$	m/s	Fluidisierungsgeschwindigkeit Spreu
$w_{FL(K)}$	m/s	Fluidisierungsgeschwindigkeit Korn
w_L	m/s	Strömungsgeschwindigkeit der Luft
$\bar{x}$	-	Mittelwert einer Stichprobe
Z	kg/s·m ²	Kornabscheidung

griechische Formelzeichen

α	-	Durchflußzahl nach DIN 1952
β	-	Signifikanzzahl = Irrtumswahrscheinlichkeit bei statistischen Tests
Γ	-	Wurfkennziffer (vgl. Fr_V)
γ	-	Konfidenzzahl = Anteil der Meßwerte die innerhalb eines Konfidenzintervalles liegen
δ	-	Neigungswinkel einer Trennfläche
ζ	-	Expansionszahl nach DIN 1952
ϵ	-	relatives Hohlraumvolumen
φ	-	Kurbelwinkel
η	-	Korndurchgang
η_{Tr}	-	Abscheidewirkungsgrad bzw. Abscheideeffizienz Korn/Stroh-Trennelement
η_{Ra}	-	Abscheidewirkungsgrad bzw. Abscheideeffizienz Korn/Spreu-Trennelement
ν_F	m^2/s	kinematische Viskosität eines Fluids
ρ_F	kg/m^3	Fluiddichte
ρ_S	kg/m^3	Feststoff-, Rein- oder Rohdichte
ρ_{Sch}	kg/m^3	Schüttdichte
σ		Standardabweichung einer Grundgesamtheit
ω	$1/s$	Winkelgeschwindigkeit

Indices

A	Auftrieb
D	Dreschen, Dreschkorb
F	Fluid
FL	fluidisiert bzw. am Wirbelpunkt
ges	gesamt
K	Korn
L	Luft
l	laminar
NKB	Nicht-Korn-Bestandteile
Ra	Korn/Spreu-Trennung auf der Reinigungsanlage
RG	Reinigungsgemisch (Korn/Spreu-Gemisch)
S	(Fest-)Stoff, solid
Sch	Schüttung, Schütt-
t	turbulent
Tr	Korn/Stroh-Trennung auf dem Hordenschüttler
VK	Kornverlust
W	Widerstand
zul	zulässig

1 Einführung

Die Funktion von Maschinen, deren Aufgabe die Verarbeitung von Stoffen ist, hängt immer auch von den Eigenschaften der verarbeiteten Stoffe ab. Die in Kapitel 2 näher erläuterten Stoffeigenschaften bestimmen nicht nur das anzuwendende Funktionsprinzip und die konstruktive Gestaltung der Maschine, sondern treten auch während des Betriebes als Störgrößen auf. Häufig kann der Störgrößeneinfluß durch entsprechende Steuerungen oder Regelungen nicht ausgeglichen werden, so daß veränderte Stoffeigenschaften zu einer Änderung des Betriebsverhaltens der betreffenden Maschine führen. Gemessene Leistungsdaten müssen deshalb immer auch Angaben zu den vorgelegenen Stoffeigenschaften enthalten. Vergleichende Aussagen sind nur möglich, wenn der Stoffeigenschaftseinfluß qualitativ oder quantitativ bewertet werden kann. Eine solche Beurteilung von Versuchsergebnissen setzt neben der Kenntnis der betreffenden Stoffeigenschaften und ihres Einflusses auf den Prozeß auch die Verfügbarkeit geeigneter Meßverfahren voraus.

Besondere Bedeutung haben Stoffeigenschaftseinflüsse nach Kutzbach [1] für Maschinen der Landtechnik. Mehr noch als bei den Maschinen der mechanischen Verfahrenstechnik, bei denen grundsätzlich die gleichen Probleme auftreten [2], variieren die Eigenschaften der in Landmaschinen verarbeiteten Stoffe, da es sich immer um Pflanzen handelt, die schon während der Vegetation zahlreichen kaum kontrollierbaren Umwelteinflüssen unterliegen.

Die wichtigste Erntemaschine in den industrialisierten Ländern ist heute der Mähdrescher. Auf mehr als zwei Dritteln der Ackerfläche werden Pflanzen angebaut, die mit dem Mähdrescher geerntet werden können, [3]. Dabei handelt es sich in der Hauptsache um Getreide sowie um Öl- und Hülsenfrüchte.

Zusätzlich zur grundsätzlichen Erntefunktion des Sammelns führt der Mähdrescher auch eine umfangreiche Aufbereitung des Erntegutes durch. Zu diesem Zweck werden in der Maschine mehrere Förder- und Trennprozesse eingesetzt. Bild 1 zeigt ein Schnittbild eines modernen Mähdreschers mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler.

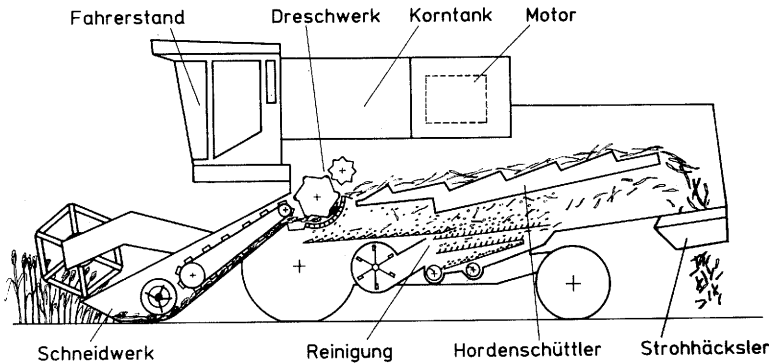


Bild 1: Konventioneller Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler.

Das Erntegut wird mit dem Schneidwerk auf großer Breite gemäht und anschließend zu einem dichteren Gutstrom auf die Breite der nachfolgenden Baugruppen zusammengefaßt. Über einen Schrägförderer gelangt es zum Dreschwerk, in dem durch Schlag- und Reibungsbeanspruchung die Körner aus ihren Fruchtständen gelöst werden. Dabei wird der Gutstrom geteilt und zwei nachfolgenden Trennprozessen zugeführt.

Der überwiegende Teil der Körner gelangt zusammen mit der Spreu und den beim Dreschen entstehenden Kurzstrohteilen durch den Dreschkorb auf die Reinigungsanlage. Der größte Teil des Stroh verläßt zusammen mit einem Anteil an Restkörnern das Dreschwerk am Ende des Dreschkorbes und gelangt auf den Hordenschüttler. Der Hordenschüttler fördert das Gut durch eine schwingende Bewegung nach hinten, dabei findet eine Schwerkraftsortierung statt, bei der die Restkörner aus dem Strohhaufwerk abgetrennt werden. Das Stroh verläßt die Maschine am hinteren Ende und wird bei Bedarf von einem Strohhäcksler zerkleinert. Ausdruschverluste entstehen durch Körner in unausgedroschenen Ähren, die über das Ende der Trennelemente hinaus gefördert werden. Die abgetrennten Restkörner

gelangen über Rücklaufeinrichtungen ebenfalls zur Reinigungsanlage, auf der sie gemeinsam mit dem anderen Teilstrom weiterverarbeitet werden.

Bei der Reinigungsanlage handelt es sich um eine Kombination aus luftdurchströmten Schwingsieben. Das Gut wird durch eine Wurfbewegung nach hinten gefördert und dabei zur Auflockerung von unten mit Luft durchströmt. Dabei treten die Körner durch das Sieb hindurch und die Nicht-Korn-Bestandteile (NKB) verlassen die Maschine am Ende des Siebes. Über Förderschnecken und Elevatoren gelangen die gereinigten Körner in den Korntank. Am Ende der Reinigungsanlage werden durch eine Siebverlängerung mit größerer Maschenweite unausgedroschene Ähren aus den Nicht-Korn-Bestandteilen abgeschieden und erneut einem Dreschvorgang zugeführt (Überkehr).

Neben dieser Hauptbauart (konventioneller Mähdrescher) werden auch Mähdrescher gebaut, bei denen der Hordenschüttler durch rotierende Trennelemente ersetzt wird. Die Sortierung während der Korn/Stroh-Trennung erfolgt bei diesen Maschinen in einem künstlichen Beschleunigungsfeld, Kutzbach [4]. Bei den Axialmähdreschern werden Dreschwerk und Hordenschüttler durch einen einzigen Rotor ersetzt, Wacker [5]. Diese Bauarten haben bisher nur in Nordamerika eine größere Verbreitung gefunden. In Europa liegt ihr Marktanteil deutlich unter 10%, Busse [6].

Die Leistung eines konventionellen Mähdreschers wird vom Kornverlust der Trennelemente für die Korn/Stroh-Trennung (Hordenschüttler) und für die Korn/Spreu-Trennung (Reinigungsanlage) begrenzt. Prinzipbedingt entstehen wegen der endlichen Länge der Trennelemente Kornverluste. Ein Teil der im zu sortierenden Gemisch enthaltenen Körner wird über das Ende der Trennelemente hinausgefördert, ohne daß er an der Trennfläche abgeschieden werden kann.

Der Kornverlust ist eine Funktion des Massendurchsatzes, die in Form einer Durchsatz/Verlust-Kennlinie dargestellt werden kann. Der Schnittpunkt der Durchsatz/Verlust-Kennlinie mit einem bestimmten Verlustniveau V_{Kzul} legt einen Massendurchsatz fest, der als Leistung des Trennprozesses bezeichnet wird, Bild 2.

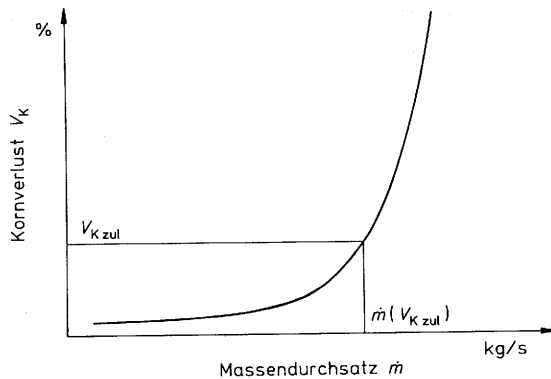


Bild 2: Durchsatz/Verlust-Kennlinie und Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher.

Diese Durchsatzleistung $\dot{m}_{V_{K\text{ zul}}}$ ist ein wichtiger Leistungskennwert während der Entwicklung und bei der Prüfung von Mähdreschern, Beck und Kutzbach [7].

Der Verlauf der Durchsatz/Verlust-Kennlinie und damit die daraus zu bestimmende Leistung hängen von zahlreichen Parametern ab, die in vier Gruppen von Einflußgrößen eingeteilt werden können, Bild 3. In die Gruppe Konstruktion fallen vor allem Einflüsse aus der konstruktiven Gestaltung der Trennelemente. Unter Einstellung sollen die Möglichkeiten der Anpassung der Maschine an unterschiedliche Betriebsbedingungen verstanden werden. Beim Mähdrescher können dazu vor allem die Antriebsdrehzahlen der einzelnen Arbeitselemente variiert werden. Der Einfluß dieser Parameter ist in der Regel die gesuchte Größe während der Messung einer Durchsatz/Verlust-Kennlinie. Bei Versuchen während der Entwicklung soll damit die Wirkung konstruktiver Änderungen festgestellt werden, während bei der Maschinenprüfung der Vergleich von Mähdreschertypen verschiedener Hersteller im Vordergrund steht.

In den Gruppen Erntebedingungen und Stoffeigenschaften werden Einflußgrößen zusammengefaßt, die bei der Messung einer Durchsatz/-Verlust-Kennlinie als Störgrößen auftreten. Ihr Einfluß auf das

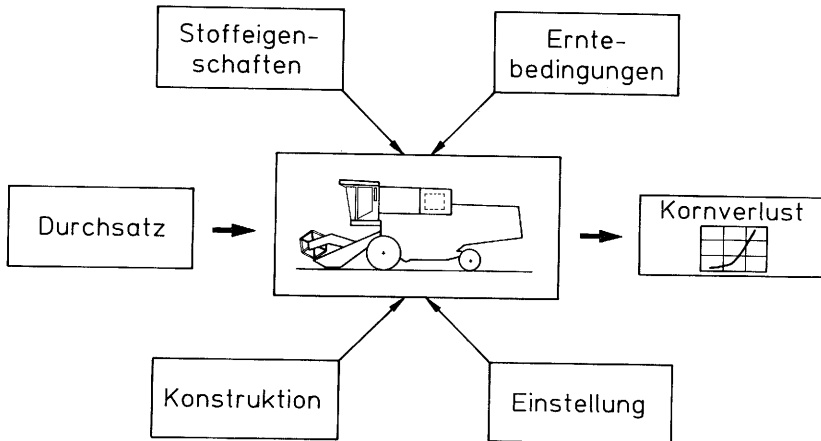


Bild 3: Parameter der Durchsatz/Verlust-Kennlinie der Trennprozesse im Mähdrescher.

Meßergebnis muß kompensiert werden, um zuverlässige und vergleichbare Ergebnisse für die Wirkung der erstgenannten Einflußgrößen zu erhalten.

Der Einfluß der Erntebedingungen, die sich im wesentlichen aus den Klimadaten, den Bestandsmerkmalen und der Geländebeschaffenheit zusammensetzen, kann durch Auswahl geeigneter Versuchsflächen und Versuchszeiten, wenn nicht vollständig kompensiert so doch minimiert werden. Der Einfluß der Stoffeigenschaften des Erntegutes hingegen kann nicht auf diese Weise eliminiert werden, da die Stoffeigenschaften des Erntegutes zahlreichen kaum kontrollierbaren Einflüssen unterliegen. Der Vergleich von Meßergebnissen wird dadurch erheblich erschwert.

Der Einfluß der Stoffeigenschaften auf den Verlauf der Durchsatz/-Verlust-Kennlinie kann erheblich sein. Für denselben Mähdrescher können beim Einsatz in verschiedenen Erntejahren und Getreidebeständen deutlich unterschiedliche Durchsatzleistungen festgestellt werden. Bild 4 zeigt die Durchsatz/Verlust-Kennlinie desselben Mähdreschers in Weizenbeständen verschiedener Erntejahre. Die Kennlinien wurden am Vergleichsmähdrescher der kanadischen Landmaschinenprüfstelle Prairie Agricultural Machinery Institute (PAMI)

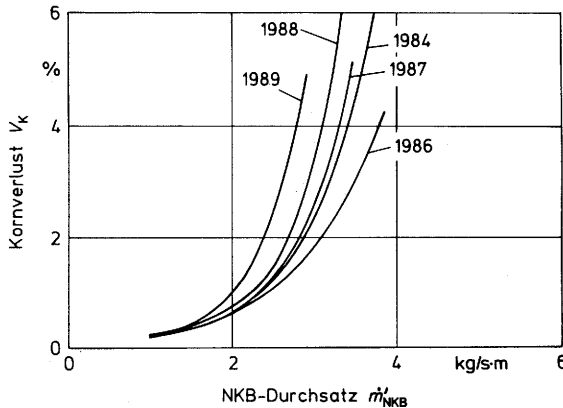


Bild 4: Durchsatz/Verlust-Kennlinie des Vergleichsmähdreschers der kanadischen Maschineprüfstelle (PAMI) in Weizenbeständen verschiedener Erntejahre [8].

gemessen [8]. Aufgetragen ist der Kornverlust der Korn/Stroh- (Schüttler) und der Korn/Spreu-Trennung (Reinigung) einschließlich der Ausdruschverluste über dem Durchsatz an Nicht-Korn-Bestandteilen (NKB). Die Durchsatzwerte sind dabei auf die Breite der Dresch- und Trennelemente (Kanalbreite) der Maschine bezogen. Der Kornverlust wird in Prozent des gesamten Kornmassendurchsatzes bzw. in Prozent des Kornertrages angegeben.

Auch während eines Erntejahres führen veränderte Stoffeigenschaften zu einem erheblich unterschiedlichen Verlauf der Durchsatz/-Verlust-Kennlinie. **Bild 5** zeigt Durchsatz/Verlust-Kennlinien eines Versuchsmähdreschers in drei verschiedenen Weizenbeständen nach eigenen Messungen. Aufgetragen ist der Kornverlust der Korn/Stroh-Trennung über dem Massendurchsatz an Nicht-Korn-Bestandteilen (NKB) des Schüttlers.

Da bisher weitgehend unbekannt ist, welche Stoffeigenschaften einen Einfluß auf die Trennprozesse ausüben und wie groß dieser Einfluß ist, kann ein zuverlässiger Vergleich von Durchsatzleistungen nur erfolgen, wenn die Durchsatz/Verlust-Kennlinien aller zu vergleichenden Maschinen zeitgleich in demselben Getreidebe-

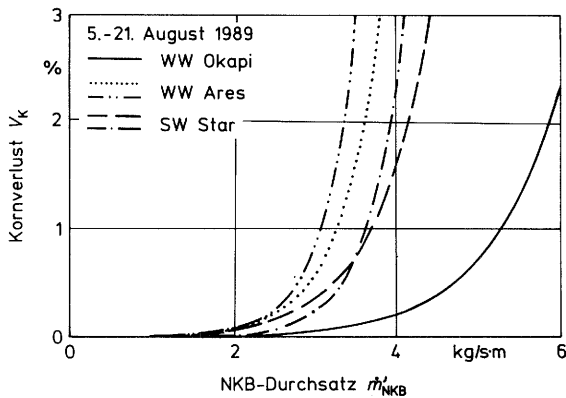


Bild 5: Durchsatz/Verlust-Kennlinien des Schüttlers eines Versuchsmähdreschers in verschiedenen Weizenbeständen nach eigenen Messungen.

stand gemessen werden. Dies ist in der Praxis kaum möglich. Die einzige bisher mögliche Methode, um Durchsatzleistungen vergleichen zu können, bei deren Messung unterschiedliche Stoffeigenschaften vorlagen, ist der Einsatz eines Vergleichsmähdreschers. Die Durchsatz/Verlust-Kennlinie eines Vergleichsmähdreschers wird gleichzeitig mit der des Prüfmähdreschers in demselben Bestand gemessen. Die Leistung des Vergleichsmähdreschers wird unabhängig vom tatsächlichen Massendurchsatz auf 100% festgesetzt, so daß die Leistung des Prüfmähdreschers relativ dazu ebenfalls als Prozentwert angegeben werden kann, Bild 6.

Die Leistung aller Prüfmähdrescher, bei deren Prüfung derselbe Vergleichsmähdrescher eingesetzt wurde, wird dadurch indirekt vergleichbar, da der Einfluß der Stoffeigenschaften durch den Bezug auf die Leistung des Vergleichsmähdreschers berücksichtigt wird. Dieses Verfahren erhöht aber den ohnehin großen Aufwand für die Leistungsmessung beim Mähdrescher erheblich. Außerdem ist der erforderliche zeitgleiche Einsatz von Prüf- und Vergleichsmähdrescher aus logistischen Gründen oft nicht zu gewährleisten. Zur Zeit werden deshalb weltweit nur von zwei Prüfstellen regelmäßig Vergleichsmähdrescher eingesetzt, [9,10].

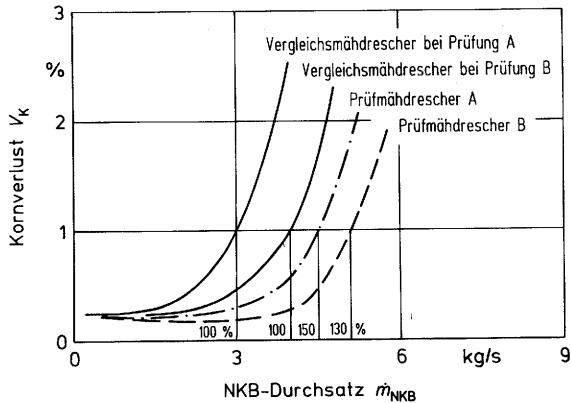


Bild 6: Relativer Vergleich der Durchsatzleistungen zweier verschiedener Prüfmähdrescher mit Hilfe eines Vergleichsmähdreschers.

Aus dieser Situation ergibt sich die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit. Es sollen Meßverfahren zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher entwickelt werden, die einfacher und kostengünstiger und möglichst auch genauer als das Vergleichsmähdrescher-Verfahren sind.

Eine grundsätzliche Verbesserung wird erreicht, wenn es gelingt, diejenigen Stoffeigenschaften, die einen Einfluß auf das Betriebsverhalten der Trennprozesse haben, zu ermitteln und die Größe dieses Einflusses zu bestimmen. In der vorliegenden Arbeit wird die Messung technologischer Stoffeigenschaften vorgeschlagen, die sowohl die Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Korn/Spreu- als auch auf die der Korn/Stroh-Trennung erlauben. Es werden Meßverfahren für diese Stoffeigenschaften entwickelt und die Ergebnisse im Hinblick auf die Korrelation von Stoffeigenschafts- und Trennprozeßleistungsänderungen dargestellt.

2 Einteilung der Stoffeigenschaften

Um Einflüsse aus Stoffeigenschaftsänderungen beschreiben zu können, ist es erforderlich, Stoffeigenschaften meßtechnisch zu erfassen. Dazu soll zunächst erläutert werden, was unter dem Begriff Stoffeigenschaft verstanden werden soll und wie dieser Begriff in der Literatur und im folgenden verwendet wird. Die folgenden Ausführungen beschränkten sich auf die Betrachtung mechanischer Eigenschaften von Feststoffen, wie sie in Maschinen in der Landtechnik und der mechanischen Verfahrenstechnik verarbeitet werden.

Ullrich [11] grenzt Feststoffe gegenüber anderen Stoffen durch die Eigenschaften Volumen- und Formbeständigkeit ab. In den meisten Fällen handelt es sich bei Feststoffen um Haufwerke aus Einzelkörnern, wobei der Begriff Korn zunächst in seiner allgemeinen physikalischen und nicht in seiner speziellen landwirtschaftlichen Bedeutung verwendet wird. Die am häufigsten angegebenen Stoffeigenschaften eines Feststoffes sind deshalb die Größe und die Form der Einzelkörner. In einem Haufwerk unterliegen diese Stoffeigenschaften einer statistischen Streuung. Die Korngrößenverteilung gilt deshalb als wichtigstes Merkmal eines Schüttgutes, Muschelknautz [12]. Für Förder- und Trennvorgänge spielt die Schüttdichte, die sich durch den Hohlraumanteil von der Stoff- oder Reindichte unterscheidet, eine wichtige Rolle [12].

Alle Vorgänge, bei denen eine Bewegung von Stoffen erforderlich ist, werden vom Reibverhalten der Stoffteilchen beeinflusst. Man unterscheidet dabei zwischen der äußeren oder Wandreibung und der inneren Reibung eines Stoffes. Als Stoffeigenschaften werden zur Beschreibung des Reibverhaltens für die äußere Reibung die Haftreibungszahl und für die innere Reibung der Böschungswinkel bestimmt.

Besonders bei den organischen Stoffen in der Landwirtschaft hat auch der im eigentlichen Feststoff enthaltene Wasseranteil einen großen Einfluß auf das Verhalten des Stoffes [1]. Als Stoffeigenschaften können der mittlere Gutfeuchtegehalt oder die Oberflächenfeuchte [13,14] angegeben werden. Entscheidend für die bei der Verarbeitung auftretenden unerwünschten Beschädigungen ist ferner das Festigkeitsverhalten der Stoffteilchen [15,16].

Die bisher genannten Stoffeigenschaften werden fast immer zur grundlegenden Charakterisierung von Stoffen verwendet, die in einem Prozeß verarbeitet werden oder die bei Versuchen verwendet wurden. Eigenschaften, die das Verhalten von Feststoffen in strömenden Medien beschreiben, werden in der Praxis ebenfalls häufig benötigt. Die am häufigsten gemessene Strömungseigenschaft ist die Schweb- bzw. Grenzfall- oder Sinkgeschwindigkeit [1,11,16,17]. Sie ist eine Zusammenfassung der geometrischen Eigenschaften, der Dichte und des Strömungswiderstandsbeiwertes von Stoffteilchen und vor allem für unregelmäßig geformte Teilchen die zuverlässigste Methode zur Beschreibung des Verhaltens in strömenden Medien. Da es sich bei der Korngröße in Haufwerken immer um eine Größenverteilung handelt, wird auch bei der Messung der Schwebegeschwindigkeit eines Haufwerkes immer eine Schwebegeschwindigkeitsverteilung ermittelt, deren Mittelwert und Standardabweichung zur Kennzeichnung der Stoffeigenschaft angegeben werden können.

Für Förder- und Trennprozesse sind daneben meist auch die rheologischen Eigenschaften eines Haufwerkes wesentlich. Zur Angabe dieser Eigenschaften werden neben der Elastizität vor allem die Fließgrenze und die Viskosität verwendet. Bei Mohs [16] sind zahlreiche Meßverfahren für rheologische Eigenschaften von landwirtschaftlichen Stoffen beschrieben. Fließgrenze und Viskosität können selbst bei Haufwerken aus faserigen Stoffen bestimmt werden. Hall und Husman [18] und später auch Hertwig [19] beschreiben z.B. ein Meßverfahren zur Bestimmung dieser Eigenschaften in einem Strohhaufwerk.

Alle bisher beschriebenen Stoffeigenschaften werden unabhängig von einem bestimmten Prozeß, in dem der betreffende Stoff verarbeitet werden soll, ermittelt. Sie lassen sich entweder durch einfache Messung physikalischer Größen oder aber nach einem definierten physikalischen Wirkprinzip bestimmen. Die Kenntnis dieser physikalischen Stoffeigenschaften reicht jedoch oft nicht aus, um die komplexen Stoffeigenschaftseinflüsse auf einen Prozeß hinreichend genau zu beschreiben. Zu diesem Zweck müssen dann unter Verwendung spezieller Meßverfahren prozeßnahe Stoffeigenschaften ermittelt werden [2], die die Darstellung von nicht mehr analytisch beschreibbaren Zusammenhängen in einer Meßgröße erlauben. In diesem Bereich gibt es sowohl standardisierte Meßverfahren als

auch solche, die auf anwendungsspezifischen Meßeinrichtungen ermittelt werden [20].

Da sich Stoffeigenschaften in ihrer Komplexität und in ihrer Aussagefähigkeit erheblich unterscheiden können, soll eine Einteilung der Stoffeigenschaften in verschiedene Gruppen vorgenommen werden. Rumpf [17] teilt die korngößenabhängigen Stoffeigenschaften in zwei Gruppen ein, wobei er zwischen Eigenschaften des Einzelkorns und Eigenschaften des Kornkollektivs unterscheidet.

Für die Prozesse der Landtechnik wird hier eine Einteilung der Stoffeigenschaften nach ihrer Komplexität in die Gruppen

- einfache physikalische Stoffeigenschaften
- komplexe physikalische Stoffeigenschaften
- technologische Stoffeigenschaften

vorgeschlagen [21].

Die Charakterisierung der Komplexität bezieht sich dabei sowohl auf die Stoffeigenschaften selbst, als auch auf das für die Bestimmung einzusetzende Meßverfahren.

Einfache physikalische Stoffeigenschaften sind demnach Stoffeigenschaften, die sich durch einfache Messung einer physikalischen Größe an einem einzelnen Haufwerksteilchen oder an mehreren einzelnen Haufwerksteilchen einer statistischen Stichprobe des Haufwerkes bestimmen lassen. Die Stoffeigenschaften dieser Gruppe stimmen weitgehend mit den Einzelkorneigenschaften von Rumpf [17] überein.

Stoffeigenschaften, bei denen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Stoffteilchen die Meßgröße beeinflussen, werden als komplexe physikalische Stoffeigenschaften bezeichnet. Sie sind mit denjenigen Eigenschaften eines Kornkollektivs nach Rumpf [17] identisch, die mit Hilfe eines physikalisch exakt beschreibbaren Wirkprinzipes ermittelt werden.

Stoffeigenschaften, die dadurch gewonnen werden, daß mit den Meßverfahren ein bestimmter Teilprozeß vereinfacht nachgebildet wird,

bilden die Gruppe der technologischen Stoffeigenschaften. Die Bezeichnung technologische Stoffeigenschaft wird dabei in Anlehnung an die technologischen Prüfverfahren der Werkstofftechnik gewählt [22], mit denen das Werkstoffverhalten unter Beanspruchungen beobachtet wird, wie sie im Betrieb auftreten. Ähnlich wie bei den Werkstoffprüfverfahren wird bei der Messung technologischer Stoffeigenschaften ein Kennwert bestimmt, der sehr komplexe, nicht mehr analytisch beschreibbare Abhängigkeiten in einen Meßwert abbildet.

In Tabelle 1 sind die im Hinblick auf die Trennprozesse im Mäh-drescher wichtigsten Stoffeigenschaften jeder Gruppe angegeben.

einfache physikalische Stoffeigenschaften	komplexe physikalische Stoffeigenschaften	technologische Stoffeigenschaften
Reibungszahl	Oberflächenfeuchte	Fluidisierungsgeschwindigkeit
mittlere Gutfeuchte	Schwebegeschwindigkeit	Durchdringungszeit
Schüttdichte	Verdichtungsverhalten	
Tausendkorngewicht	Scherverhalten	
Korn/NKB-Verhältnis	Böschungswinkel	
Größenverteilung		

Tabelle 1: Wichtige Stoffeigenschaften für die Beurteilung der Leistung der Trennprozesse im Mäh-drescher.

3 Bisherige Untersuchungen zum Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Trennprozesse im Mähdrescher

Schon zur Zeit des Handdrusches mit dem Dreschflegel war der Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Leistung des Verfahrens bekannt. Balassa u. Nachtweh [23] nennen für das Arbeitsergebnis bei Handdrusch als wesentliche Einflußgrößen "den Fleiß und die Geschicklichkeit des Arbeiters" und "den Zustand, die Güte und die Reife des zu dreschenden Materials". Dieser Stoffeigenschaftseinfluß auf die Leistungsfähigkeit wurde auch während der sich mit der Mechanisierung der Getreideernte entwickelnden Landmaschinenprüfung schon früh erkannt. Das Landmaschinen-Institut Landsberg setzte deshalb bereits 1935 bei der Dreschmaschinen-Prüfung eine sogenannte "Meßdreschmaschine" ein [24], um einen Vergleichswert (Ausdruschbeiwert) für die Dreschfähigkeit des bei der Prüfung verwendeten Getreides zu ermitteln und damit die Ergebnisse verschiedener geprüfter Maschinen vergleichen zu können. Diese Entwicklung führte zum bereits beschriebenen Einsatz der Vergleichsmähdrescher bei Leistungsmessungen an modernen Mähdreschern.

Für die Konzeption und Auslegung verfahrens- und landtechnischer Maschinen waren und sind zuverlässige Werte für die Eigenschaften der zu verarbeitenden Stoffe unverzichtbar. Parallel zur technischen Entwicklung setzte deshalb schon früh die Forschung auf dem Gebiet der Stoffeigenschaftsmessung ein, die sich heute zu einem eigenen Wissensgebiet in der Verfahrenstechnik (Partikelmeßtechnik, Rumpf [17]) und in der Landtechnik (Mohsenin [16]) entwickelt hat. Frühe Untersuchungen ermittelten meist Stoffeigenschaften, die bei der Lagerung von landwirtschaftlichen Produkten wichtig waren [25] oder in der Pflanzenzüchtung zur Beurteilung verwendet wurden [26]. Eine umfassende Literaturzusammenstellung über die bis zum Ende der sechziger Jahre auf dem Gebiet der Stoffeigenschaften landwirtschaftlicher Produkte durchgeführten Arbeiten ist bei Mohsenin [16] zu finden. Das Reibverhalten und die mechanischen Eigenschaften von Körnerfrüchten werden in Veröffentlichungen von Kutzbach u. Scherer [27,28] zusammengefaßt.

Mit dem Aufkommen leistungsfähiger Mähdrescher [29,30] gewann die Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistungs-

fähigkeit der Dresch- und Trennprozesse zunehmende Bedeutung. Ausgehend von der Frage, wie sich die Leistung und die Arbeitsweise der Trennelemente optimieren läßt, wurden erste Versuche unternommen, den Einfluß einzelner Stoffeigenschaften auf das Betriebsverhalten der Trennprozesse im Mähdrescher zu untersuchen.

Im Rahmen einer Analyse der Strömungsverhältnisse in der Reinigungsanlage untersuchte schon Persson [31] die aerodynamischen Eigenschaften des Reinigungsgutes. Segler u. Wieneke [32] beobachteten einen starken Kornverlustanstieg beim Mähdrescher, wenn Getreide mit Grüngutbesatz geerntet wurde.

Da die Gutfeuchte, das Reibverhalten und die elastischen Eigenschaften die für das Betriebsverhalten der Trennprozesse maßgeblichen Größen sind, wurden bei Leistungsmessungen der Trennprozesse im Mähdrescher vor allem diese Stoffeigenschaften gemessen, [33,34,35,36]. Die Beurteilung des Einflusses von Änderungen dieser "Elementar"-Stoffeigenschaften erfordert aber, wegen der Wechselwirkungen der Teilchen im Haufwerk auf den Trennelementen, komplexe Modellvorstellungen, für die es zwar einige Ansätze [37,38], aber bis heute keine geschlossene Darstellung gibt.

Die Suche nach direkten Korrelationen zwischen einfachen physikalischen Stoffeigenschaften und der Trennprozeßleistung war meist wenig erfolgreich. Vor allem die relativ leicht zu messende mittlere Gutfeuchte wurde häufig als bestimmende Stoffeigenschaft im Hinblick auf die Trennprozeßleistung angesehen. Die sehr widersprüchlichen Beobachtungen zum Einfluß der mittleren Gutfeuchte unterstützen die Annahme, daß nicht die mittlere Gutfeuchte, sondern die Oberflächenfeuchte [13] eine wesentliche Rolle für die Funktion der Trennprozesse spielt. Neben der mittleren Gutfeuchte sind für die Oberflächenfeuchte vor allem die Klimadaten, insbesondere die relative Luftfeuchte [39] maßgebend. Während den meisten Untersuchungen, wegen des großen Versuchsaufwandes, eher zufällige Ergebnisse aus Feldversuchen zugrunde liegen, konnten unter Laborbedingungen einige Abhängigkeiten nachgewiesen werden [40], die dann aber nicht ohne weiteres auf die realen Einsatzbedingungen übertragbar waren.

Die erste umfassende Untersuchung zum Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Leistung der Trennprozesse wurde 1977 von Huismann [41] veröffentlicht. Er führte systematische Feld- und Laborversuche durch, bei denen er das Verlustverhalten des Schüttlers untersuchte und gleichzeitig die untenstehenden Stoffeigenschaften mit reproduzierbaren Meßverfahren erfaßte:

- mittlerer Feuchtegehalt von Stroh
- Längenverteilung von Stroh aus dem Schüttlerübergang
- Gleitreibungszahl Stroh/Stroh von Einzelhalmen
- Elastizitätsmodul von Einzelhalmen
- Schüttdichte eines Strohhaufwerkes

Obwohl er feststellte, daß die Kornverluste des Schüttlers von der Größe des Strohmassendurchsatzes abhängen, die Stoffeigenschaften also nur Parameter, nicht aber unabhängige Variable der Funktion des Kornverlustes vom Massendurchsatz (Durchsatz/Verlust-Kennlinie) sein können, bestimmte er auch die Korrelationskoeffizienten der Korrelation zwischen den Kornverlusten bei verschiedenen Strohmassendurchsätzen mit den einzelnen Stoffeigenschaften, fand aber keine signifikanten Korrelationen. Für die Laborversuche ersetzte Huismann [41] den Schüttler durch einen Entmischungsversuch (vgl. Kapitel 4.2). Statt der Kornverluste mißt er die Zeit, die erforderlich ist, um 75% einer aufgegebenen Kornmasse abzuscheiden. Da die Strohmassenbelegung beim Entmischungsversuch mit $m_{\text{NKB}}^* = 2 \text{ kg/m}^2$ stets konstant war, entspricht der Entmischungsversuch, anders als bei den Feldversuchen, dem Betrieb des Schüttlers mit konstantem Strohmassendurchsatz. Der dem Kornverlust entsprechende Zeitwert $t_{0,75}$ wurde also unter stets gleichen Bedingungen ermittelt. Die Stoffeigenschaften wurden während der Laborversuche durch Konditionierung bei verschiedenen Luftfeuchten verändert. Huismann [41] fand bei den Versuchen, daß die Gleitreibungszahl und die Elastizität eindeutig Funktionen der mittleren Gutfeuchte sind. Dabei ist zu beachten, daß durch die Konditionierung des Versuchsgutes in einer Klimakammer die Oberflächenfeuchte relativ gut mit der mittleren Gutfeuchte übereinstimmt haben dürfte. Auch bei den Laborversuchen fand Huismann [41] keine eindeutige Korrelationen der gemessenen Stoffeigenschaften mit dem Ergebnis der Entmischungsversuche. Lediglich mit der mittleren Gutfeuchte und der Kennzahl der Längenverteilung

bzw. der Schüttdichte ließ sich eine mäßige Korrelation mit der Entmischungszeit herstellen. Festzuhalten bleibt, daß sich auch bei den Untersuchungen von Huisman [41] keine direkte Korrelation zwischen einfachen physikalischen Stoffeigenschaften und der Leistung der Trennprozesse herstellen ließ.

Der Gedanke, die Durchsatzleistung der Trennprozesse im Mähdrescher mit den Änderungen komplexerer Stoffeigenschaften zu vergleichen, wurde 1977 von Stephens u. Rabe [42] aufgegriffen. Sie betonten die Notwendigkeit komplexere physikalische Stoffeigenschaften, statt einfacher physikalischer Stoffeigenschaften zu messen, da es nicht möglich sei, auf die Eigenschaften eines Haufwerks aus der Messung der Eigenschaften der Einzelteilchen zu schließen. Stephens u. Rabe [42] berichten außerdem über eine umfangreiche Forschungstätigkeit zur Untersuchung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Durchsatzleistung von Mähdreschern in den USA, die vor allem von der Fa. John Deere & Company, Moline/Illinois durchgeführt und in öffentlichen Forschungseinrichtungen gefördert wurde. Dabei stand vor allem die Verbesserung und Vereinfachung der Maschinen- und Komponententests während der Produktentwicklung im Vordergrund. Der Beginn dieser Arbeit fällt etwa mit den Versuchen von Huismann [41] zusammen, deren Durchführung in den USA bekannt war und deren Ergebnisse die dortigen Untersuchungen beeinflusste. Bei John Deere & Company entstanden in diesem Zusammenhang mehrere Arbeitspapiere (Technical Reports) [43,44,45,46].

Ausgehend von der Erkenntnis, daß der mittlere Gutfeuchtegehalt, die klimatischen Bedingungen und das Korn/Stroh-Verhältnis keine Korrelation mit Leistungsänderungen eines Mähdreschers zeigten, schlägt West [43] vor, standardisierte Meßverfahren für komplexe Stoffeigenschaften einzuführen. Die Ergebnisse dieser Stoffeigenschaftsmessungen sollten mit den Leistungsänderungen eines Referenzmähdreschers verglichen und anschließend allgemein auf die Ergebnisse auch anderer Maschinen übertragen werden. Um eine zuverlässige Datenbasis zu erhalten, nennt er einen Mindestversuchszeitraum von drei Ernteperioden. Er hält den vollständigen Ersatz der Vergleichsmaschine durch Meßverfahren für Stoffeigenschaften, auch bei guten Ergebnissen, für unwahrscheinlich und nennt als wahrscheinlicheres Ergebnis die Möglichkeit eines allgemeinen

quantitativen Vergleichs von Stoffeigenschaften zwischen verschiedenen Beständen und Jahren. Rabe [44] folgt im wesentlichen den allgemeinen Betrachtungen von West [43], gibt aber bereits konkrete Stoffeigenschaften zur Beurteilung der einzelnen Trennprozesse an. Für die Korn/Stroh-Trennung nennt er die Oberflächenfeuchte und die Größenverteilung der Haufwerksteilchen, aber auch bereits einen Abscheidewert, wie er auf einem Entmischungsprüfstand gemessen werden kann. Für die Korn/Spreu-Trennung sind seiner Ansicht nach vor allem die Stoffeigenschaften der NKB-Fraktion des Reinigungsgutes maßgeblich, so daß die Längenverteilung der NKB ein wesentliches Kriterium darstellt. Es sollten außerdem auch die Gleitreibungszahlen gegenüber Metall, die innere Reibung im Haufwerk und die mittleren Gutfeuchtegehalte gemessen werden. Sein Bericht enthält bereits Skizzen für entsprechende Prüfstände. In einer weiteren Untersuchung [45] stellt Rabe ein Verfahren zur Ermittlung der Längenverteilung von Reinigungsübergängen aus Mähdreschern vor. Mit einer kombinierten Windsichtung und Siebung werden mit einer speziellen Trennmaschine Längenverteilungen mit guter Wiederholgenauigkeit ermittelt.

1981 veröffentlichten Hall u. Husman [18] im Anschluß an ein bei John Deere abgehaltenes Symposium [46] eine Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen zum Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Leistung von Mähdreschern. In dieser, für alle weiteren Arbeiten grundlegenden, Veröffentlichung werden die verwendeten Meßverfahren für Stoffeigenschaften und die Ergebnisse von Feldversuchen im Hinblick auf den Vergleich der gemessenen Stoffeigenschaften mit der Leistung eines konventionellen Mähdreschers in Weizen und Gerste dargestellt. Gemessen wurden vor allem komplexe physikalische Stoffeigenschaften sowie einige einfache physikalische Stoffeigenschaften, Tabelle 2.

Anders als Huisman [41] verwenden Hall u. Husman [18] eine Definition der Trennprozeßleistung, die der in Kapitel 1 angegebenen entspricht. Die Trennprozeßleistung wird aus den Durchsatz/-Verlust-Kennlinien als NKB-Massendurchsatz bei 1% Kornverlust sowohl für die Korn/Stroh- als auch für die Korn/Spreu-Trennung bestimmt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte mit Hilfe einer statistischen Korrelationsanalyse, bei der alle gemessenen

Stoffeigenschaften mit den gemessenen Trennprozeßleistungen verglichen wurden.

Da die Daten der Untersuchung aus lediglich zwei Feldversuchsperioden stammen, erheben die Autoren keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit der Ergebnisse. Sie ziehen aber einige wichtige Schlußfolgerungen aus ihren Messungen.

So stellten sie beispielsweise fest, daß die relative Luftfeuchte eine wesentliche Rolle bei Leistungs- und Stoffeigenschaftsänderungen spielt. Damit unterstützen sie die Ansicht von Rabe [44], der die Oberflächenfeuchte für eine wesentliche Einflußgröße hält, vgl. Beck [13]. Interessant ist auch, daß Hall u. Husman [18] keine Korrelation zwischen Leistungsänderungen des Versuchsmähdreschers und Leistungsänderungen an verkleinerten Modelltrennelementen feststellen konnten. Eine Maßstabsverkleinerung führt offensichtlich auch zu Änderungen in der Funktionsweise, da die verarbeiteten Stoffe nicht analog nach einer Ähnlichkeitsbeziehung verändert werden können.

Neben den in Tabelle 2 dargestellten einfachen Korrelationen, wurden auch mehrere Stoffeigenschaften als Variable in der Korrelation verwendet. Die Korrelationskoeffizienten nahmen dann Werte bis $r^2 = 0,9$ an. Hall u. Husman [18] leiten daraus das Vorhandensein sehr komplexer Abhängigkeiten während der Trennprozesse ab, ohne diese näher beschreiben zu können.

In der umfangreichen Beschreibung der Versuchseinrichtungen wird auch ein Fluidisierungsprüfstand erwähnt, auf dem das Verhalten einer Spreuschicht bei Durchströmung mit Luft untersucht werden kann. Der Gedanke einen Fluidisierungsprüfstand einzusetzen, geht unter anderem auf die Arbeit von Freye [61] zurück, der bei seinen Untersuchungen die Wirbelschicht als optimalen Betriebszustand für die Reinigungsanlage nachwies. Bei der Auswertung der Daten in [18] sind allerdings keine Ergebnisse aus diesem Versuch erwähnt. Bemerkenswert ist, daß damit bereits ein weiterer Schritt von den komplexen physikalischen Stoffeigenschaften hin zu technologischen Stoffeigenschaften unternommen wurde.

Stoffeigenschaften	Trennprozeßleistungen			
	Korn/Stroh-Trennung (Schüttler)		Korn/Spreu-Trennung (Reinigung)	
	$\dot{m}_{\text{NKB}(1\%)} \text{ Weizen}$	$\dot{m}_{\text{NKB}(1\%)} \text{ Gerste}$	$\dot{m}_{\text{NKB}(1\%)} \text{ Weizen}$	$\dot{m}_{\text{NKB}(1\%)} \text{ Gerste}$
Kompressionsfederkonstante Stroh	H			
relative Luftfeuchte	H	H		
Feuchtegehalt Stroh	H			
Zugfestigkeit Stroh	M			
Böschungswinkel Korn	M	M	H	
Strohviskosität	M			
Umgebungstemperatur	M	H		
Tageszeit		H		
Schüttdichte Stroh (Trockenmasse)		H		
Schüttdichte Stroh (Feuchtmasse)		M		
Scherfederkonstante Stroh		H		
Gleitreibungszahl Stroh/Stahl		M		
mittlere Strohlänge		M		
Feuchtegehalt Korn			H	
Schüttdichte Korn (Feuchtmasse)			H	
Schüttdichte Spreu (Trockenmasse)			H	
Gleitreibungszahl Spreu/Stahl			H	
Feuchtegehalt Spreu			M	
mittlere Spreulänge				H

Korrelationskoeffizient: H: $r^2 \geq 0,6$ M: $0,4 \leq r^2 \leq 0,6$ -: $r^2 \leq 0,4$

Tabelle 2: Korrelationsmatrix der gemessenen Stoffeigenschaften mit den gemessenen Trennprozeßleistungen nach Hall u. Husman [18].

1986 berichten Srivastava et al. [47] über die Fortsetzung der Arbeiten von Hall u. Husman [18]. Eine Neubearbeitung dieser Veröffentlichung [48] von denselben Autoren erschien 1990 mit einem erweiterten Literaturteil unter demselben Titel. Die Neubearbeitung [48] verwendet dieselben Daten wie [47], es werden jedoch in den dargestellten Diagrammen zusätzlich zu den berechneten Regressionskurven auch die tatsächlich gemessenen Punkte angegeben.

Die Leistungsbestimmung der Trennprozesse entspricht dem von Hall u. Husman [18] verwendeten Verfahren. Als Leistungsgrenze für die Reinigungsanlage wird in [47,48] allerdings statt 1% zulässigem Kornverlust eine Verlustgrenze von 0,5% definiert.

Srivastava et al. [47] geben eine Definition für die Bestandteile der Stofffraktionen an, die in der vorliegenden Arbeit übernommen wird. Demnach wird unter Korn diejenige Fraktion verstanden, die in den Korntank gelangt, ohne daß eine weitere Reinigung oder Sortierung durchgeführt wird. Spreu sind alle Nicht-Korn-Bestandteile, die über das Ende der Reinigungsanlage hinausgefördert werden. Entsprechend wird unter Stroh die über das Ende des Schüttlers hinausgeförderte Fraktion verstanden.

Bei der Auswahl der gemessenen Stoffeigenschaften zeigt sich gegenüber Hall u. Husman [18] ein gewisser Rückschritt. Aus Gründen mangelnder Korrelation in der Untersuchung von Hall u. Husman [18] und vor allem wegen des großen Aufwandes für reproduzierbare Messungen, wurden praktisch alle komplexen physikalischen Stoffeigenschaften aus dem Versuchsprogramm gestrichen, so daß nur noch die untenstehenden Eigenschaften übrigblieben:

- mittlerer Feuchtegehalt von Korn, Spreu und Stroh
- Schüttdichte von Korn, Spreu und Stroh
- Gleitreibungszahl von Korn, Spreu und Stroh gegen Stahl
- Böschungswinkel eines Kornhaufwerkes
- Mittelwert der Spreulängenverteilung
- Kompressionsfederkonstante von Spreu und Stroh

Als einzige komplexe physikalische Stoffeigenschaften nach der in Kapitel 2 angegebenen Definition bleiben damit der Böschungswinkel und die Kompressionsfederkonstante übrig.

Besondere Bedeutung erhält die Untersuchung [48], außer durch die breite zugrundeliegende Datenbasis, vor allem durch die Veröffentlichung zahlreicher Originaldaten und der zur Beurteilung erforderlichen statistischen Angaben. Die Messungen wurden, unter Einbeziehung der Ergebnisse von Hall u. Husman [18], über einen Fünfjahreszeitraum in Feld- und Laborversuchen bei relativ unterschiedlichen Erntebedingungen durchgeführt. Für jede der gemessenen Stoffeigenschaften wurde die Korrelation mit der Leistung von Schüttler und Reinigungsanlage untersucht.

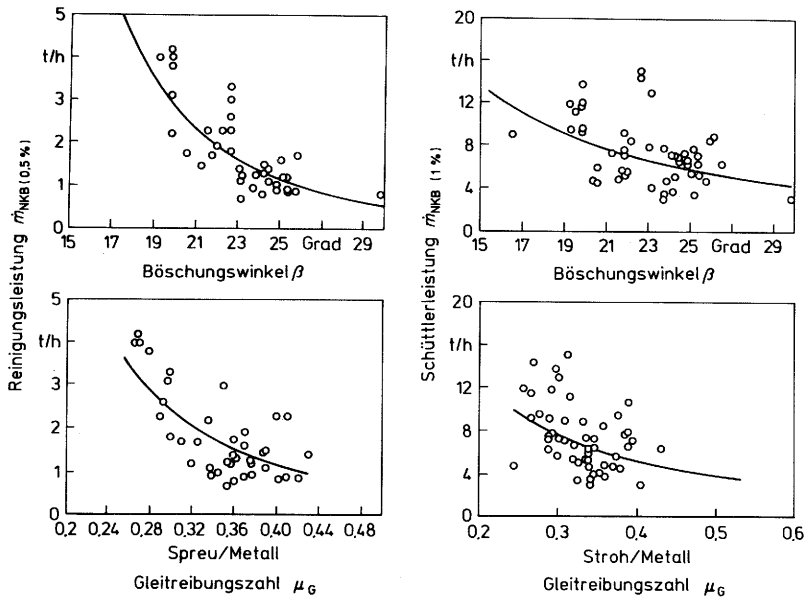


Bild 7: Reinigungs- und Schüttlerleistung als Funktionen des Böschungswinkels und der Gleitreibungszahl von Spreu bzw. Stroh nach Srivastava et al. [48].

Für die Änderung der Reinigungsleistung wurde ein Zusammenhang mit dem Böschungswinkel, mit der Schüttdichte des Kornes, mit der Kompressionsfederkonstante der Spreu und mit der Gleitreibungszahl der Spreu gegen Metall gefunden. Für die Schüttlerleistung ergaben sich entsprechende Korrelationen mit dem Böschungswinkel eines

Kornhaufwerks, der Gleitreibungszahl des Strohs, der Schüttdichte des Korns und der Kompressionsfederkonstante des Strohs.

Bild 7 zeigt beispielhaft die von Srivastava et al. [48] berechneten Korrelationen zwischen dem Böschungswinkel und der Gleitreibungszahl von Spreu bzw. Stroh gegen Metall mit der Reinigungs- und der Schüttlerleistung. Für die Regression wurde eine Potenzfunktion angesetzt.

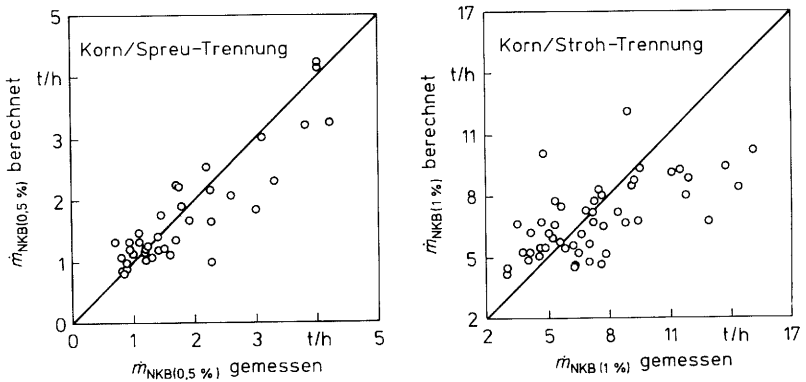


Bild 8: Zusammenhang zwischen gemessener und aus einem Stoffeigenschaftsmodell berechneter Trennprozeßleistung nach Srivastava et al. [47].

Aus ihren Ergebnissen schließen die Autoren, daß die Reinigungsanlage etwa dreimal empfindlicher auf Stoffeigenschaftsänderungen reagiert als der Schüttler. Ähnlich wie Hall u. Husman [18] versuchen auch Srivastava et al. [47], wegen der komplexen Abhängigkeiten der gemessenen Stoffeigenschaften mit den Leistungsänderungen der Trennprozesse, ein mehrparametrisches Modell mit Hilfe einer schrittweisen linearen Regressionsrechnung zu erhalten. Die Reinigungsleistung wird als Funktion von Böschungswinkel, Spreugleitreibungszahl und Schüttdichte des Korns, die Schüttlerleistung als Funktion von Böschungswinkel, Strohgleitreibungszahl sowie der mittleren Gutfeuchte von Korn und Stroh dargestellt.

Bild 8 zeigt den so ermittelten Zusammenhang zwischen der aus diesen Modellen berechneten Leistung und der tatsächlich gemessenen Leistung.

Um diese rein statistische Modellbildung zu vermeiden, wird in der vorliegenden Arbeit versucht, wesentlich komplexere Stoffeigenschaften zu messen und einen direkten Zusammenhang dieser Stoffeigenschaften mit den Trennprozeßleistungen nachzuweisen. Der Grundgedanke dabei ist, ein physikalisches Modell, das die meisten der bisher erwähnten einfachen und komplexen physikalischen Stoffeigenschaften beinhaltet, dadurch zu schaffen, daß die Wechselwirkungen in einem trennprozeßnahen, aber standardisierten Versuch zusammengefaßt werden und damit die Modellbildung von der Auswertung zum Versuch verlegt wird.

Ein anderer Lösungsansatz liegt in der Bildung von komplexen Simulationsmodellen für die Trennprozesse im Mähdrescher, bei denen mit Hilfe komplexer physikalischer Modellvorstellungen der Einfluß von Veränderungen einfacher physikalischer Stoffeigenschaften berücksichtigt werden kann.

Ein erster Ansatz wurde im Zusammenhang mit der Untersuchung von Srivastava et al. [47] von Mahoney u. Srivastava [49] veröffentlicht. Sie beschreiben ein Simulationsmodell für die Reinigung und den Schüttler des Mähdreschers bei dem außer dem Massendurchsatz auch die Stoffeigenschaften als Eingangsgrößen auftreten. Obwohl Srivastava et al. [47] keine Korrelation zwischen den mittleren Gutfeuchten und der Leistungsänderung nachweisen können, werden die Stoffeigenschaften im Simulationsmodell als Funktionen der mittleren Gutfeuchte berechnet. Dieses einfache Simulationsmodell wurde von Mahoney [50] weiter bearbeitet und in Form einer bisher nicht veröffentlichten Dissertation zusammengefaßt.

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Überlegungen zur Auswahl der Stoffeigenschaften

Die wesentlichen Kriterien für die Auswahl geeigneter Stoffeigenschaften zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher sind der bei der Messung entstehende Aufwand und die zu erwartende Aussagesicherheit. In Bild 9 sind einige grundsätzliche Gedanken zur Abschätzung des Aufwandes dargestellt.

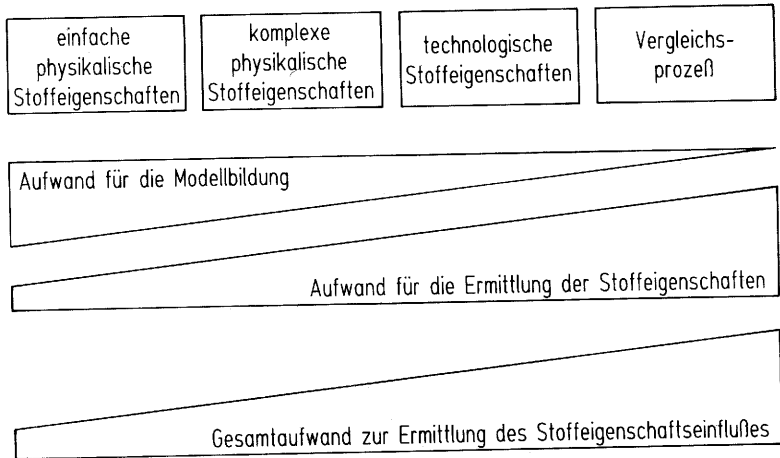


Bild 9: Aufwand für die Ermittlung von Stoffeigenschaften unterschiedlicher Komplexität.

Die Komplexität der Stoffeigenschaften nimmt von links nach rechts zu, im gleichen Maß nimmt auch der Aufwand für die Ermittlung der Stoffeigenschaften zu. Während beim Vergleichsprozeß die gemessenen Leistungen von Prüf- und Vergleichsmähdrescher im Idealfall ohne weitere Modellbildung oder Rechnung verglichen werden können, nimmt der Aufwand für die Modellbildung mit abnehmender Komplexität der Stoffeigenschaften erheblich zu.

Bei der Verwendung von einfachen physikalischen Stoffeigenschaften zur Beurteilung der Trennprozeßleistung, müssen schließlich

komplexe Abhängigkeiten in einer mathematischen Modellvorstellung zusammengefaßt werden, um beispielsweise die Wirkung einer Veränderung der Reibungszahl auf den Trennprozeß darstellen zu können.

Insofern besteht hier eine Analogie zur Festigkeitslehre. Mit Hilfe einer mathematischen Modellvorstellung (Finite Element Theorie) wird auf diesem Gebiet heute aus den "einfachen Stoffeigenschaften" Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul das Beanspruchungsverhalten komplexer Bauteile simuliert. Bauteilversuche (Vergleichsprozesse) können damit in vielen Fällen ersetzt werden.

Die Stoffeigenschaften des Erntegutes müssen bei jeder Leistungsmessung ermittelt werden. Der Aufwand für die Modellbildung entfällt jedoch, sobald eine hinreichende Modellvorstellung zur Verfügung steht. Der in Bild 9 dargestellte kostenmäßige Gesamtaufwand wird dann praktisch ausschließlich vom Aufwand für die meßtechnische Erfassung der Stoffeigenschaften bestimmt, da bei Anwendung moderner Rechentechniken der Aufwand für die Modellauswertung nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Für die Trennprozesse im Mähdrescher existieren bisher keine hinreichend genauen Simulationsmodelle, die das Prozeßverhalten bei der Änderung einfacher physikalischer Stoffeigenschaften beschreiben können. Aus diesem Grund nimmt auch die Aussagesicherheit mit abnehmender Komplexität der Stoffeigenschaften stark ab. Beim Einsatz von technologischen, also prozeßnahen, Meßverfahren für Stoffeigenschaften wird deshalb ein Optimum zwischen Aufwand und Aussagesicherheit erreicht.

Im folgenden werden zwei Meßverfahren für technologische Stoffeigenschaften zur Beurteilung des Stoffeigenschaftseinflusses auf die Leistung der Trennprozesse vorgeschlagen.

4.2 Trenneigenschaften

4.2.1 Korn/Stroh-Trennung auf dem Hordenschüttler

Durch den Dreschvorgang wird der Stoffstrom im Mähdrescher in zwei Teilströme aufgeteilt, die verschiedenen Trennprozessen zugeführt werden. Der Teilstrom, der nicht durch den Dreschkorb abgeschieden wird, verläßt das Dreschwerk am Ende des Dreschkorbes und gelangt zur Korn/Stroh-Trennung. Er enthält den größten Teil der im Gesamtstoffstrom enthaltenen Nicht-Korn-Bestandteile (NKB) und einen von der Höhe des Massendurchsatzes abhängigen Anteil an nicht durch den Dreschkorb abgeschiedenen Körnern. Die Aufgabe der Korn/Stroh-Trennung ist die Abscheidung der noch in den Nicht-Korn-Bestandteilen (NKB) enthaltenen Kornmasse. Dazu ist ein Sortiervorgang erforderlich, der eine Entmischung des Korn/NKB-Gemisches bewirken muß, damit die statistisch im Haufwerk verteilten Körner zu der Trennfläche gelangen, an der sie abgeschieden werden können.

Für diese Trennaufgabe eignen sich mechanische Trennprozesse, bei denen die Trennfläche zu Schwingungen angeregt wird, die in das Haufwerk übertragen werden. Im Haufwerk treten dann periodisch veränderliche Beschleunigungen auf, die zu Relativbewegungen des Haufwerks gegenüber der Trennfläche und der Haufwerksteilchen untereinander führen. Dadurch wird sowohl der Durchtritt der Körner durch das Haufwerk (Entmischung), als auch die Abscheidung der Körner an der Trennfläche ermöglicht. Wegen der in Größe und Gestalt sehr unterschiedlichen Haufwerkssorten, stellt die Abscheidung des Kornes an der Trennfläche im allgemeinen keine Schwierigkeit dar. Der Erfolg des Sortiervorganges wird vielmehr wesentlich von der Entmischung des Haufwerks bestimmt. Die für diese Art der mechanischen Stofftrennung eingesetzten Trennelemente nennt man Schwingsiebe, Ullrich [11]

Für die Korn/Stroh-Trennung im konventionellen Mähdrescher wird eine besondere Bauform der Schwingsiebe, die als Hordenschüttler bezeichnet wird, eingesetzt. Die von der Kanalbreite des Mähdreschers bestimmte Breite des Trennelementes wird beim Hordenschüttler in mehrere nebeneinander angeordnete Schüttelsiebe (Horden) aufgeteilt. Die Horden sind an beiden Enden auf je einer gemein-

samen Kurbelwelle auf Kurbelkröpfungen mit unterschiedlichen Kröpfungswinkel angebracht (Doppelkurbel-Hordenschüttler, Sonnenberg [51]). Eine der Kurbelwellen wird angetrieben (Erregerwelle), während die zweite lediglich zur Führung dient. Getriebetheoretisch handelt es sich bei den einzelnen Horden um umlauffähige Gelenkvierecke (Doppelkurbelgetriebe) mit paarweise gleichen Längen der Gelenkglieder, Bild 10.

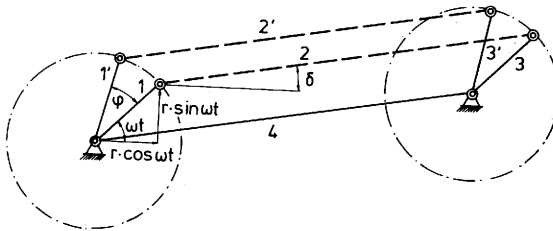


Bild 10: Funktionsschema des Doppelkurbel-Hordenschüttlers.

Die Koppel führt bei dieser Anordnung periodische Schwingungen in vertikaler und horizontaler Richtung aus. Beim Hordenschüttler ist die Koppel als Trennfläche ausgebildet und dient sowohl der Trennung, als auch der Förderung des Stoffstroms. Die Kinematik der Trennfläche wird von der Länge r der Kurbel (= Erregeramplitude A_e) und von der Winkelgeschwindigkeit bzw. Erregerfrequenz der Kurbel ($\omega = 2\pi \cdot f_e$) bestimmt, Bild 10. Alle Punkte auf der Trennfläche einer Horde bewegen sich auf einer Kreisbahn mit dem Radius A_e . Für die Horizontal- bzw. Vertikalkomponenten der Bewegung gelten die Gleichungen (1).

Das Haufwerk bewegt sich abhängig von der Größe der Beschleunigung der Trennfläche. Eine Modellvorstellung für die Bewegung des Haufwerkes auf der Trennfläche kann aus der Theorie der Bewegung einer

Weg

$$\begin{aligned}x(t) &= r \cdot \cos(\omega t) \\ y(t) &= r \cdot \sin(\omega t)\end{aligned}$$

Geschwindigkeit

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= -r \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \\ \dot{y}(t) &= r \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)\end{aligned} \quad (1)$$

Beschleunigung

$$\begin{aligned}\ddot{x}(t) &= -r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \\ \ddot{y}(t) &= -r \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)\end{aligned}$$

Punktmasse gewonnen werden. Für die Ableitung der Bewegungstheorie sei auf Beisteiner [52] und auf entsprechende Forschungsarbeiten, zum Beispiel von Rochell [53], verwiesen.

Beim Hordenschüttler sind Erregeramplitude und Erregerfrequenz so gewählt, daß der Kraftschluß zwischen Haufwerk und Trennfläche periodisch aufgehoben wird. Die notwendige Bedingung dafür ist, daß die Vertikalbeschleunigung der Trennfläche im negativen Bereich größer als die Erdbeschleunigung wird.

$$\ddot{y}(t) \geq -g \quad (2)$$

Ist diese Ablösebedingung erfüllt, führt eine Punktmasse, und in erster Näherung auch ein Haufwerk großer Schichtdicke, eine schiefe Wurfbewegung über der Trennfläche aus. Wesentlich für den Verlauf der Wurfbewegung ist die als Vertikalbeschleunigungsverhältnis ausgedrückte Wurfkennziffer Γ .

$$\Gamma = \frac{A_e \cdot (2\pi \cdot f_e)^2}{g} \quad (3)$$

Dieses auch als Froudezahl Fr_v bezeichnete Beschleunigungsverhältnis bestimmt die Wurfdauer, wobei im Bereich $1 \leq \Gamma \leq 3,3$ die Wurfzeit zwischen null und der Periodendauer der Trennflächenschwingung variiert. Für Wurfkennziffern größer als 3,3 treten dann Wechsel- oder Mehrfachwürfe auf. Diese Abhängigkeiten gelten streng nur für die Bewegung einer Punktmasse. Baader et al. [54] haben jedoch nachgewiesen, daß die Wurfkennziffer auch zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens eines Strohhaufwerkes großer Schichthöhe geeignet ist.

Für die weiteren Überlegungen ist es wichtig, daß der Trennvorgang auf dem Hordenschüttler nur von der vertikalen Bewegungskomponente des Haufwerkes bestimmt wird. Der Fördervorgang setzt sich aus der schiefen Wurfbewegung in Folge der periodischen Beschleunigung des Haufwerkes und aus einer Schrittförderung zusammen, die von der Phasenverschiebung der einzelnen Hordenbewegungen verursacht wird, Sonnenberg [51].

4.2.1.1 Konstruktive Gestaltung des Hordenschüttlers

Ausgeführte Hordenschüttler bestehen aus mehreren nebeneinander angeordneten, kastenförmigen Horden, deren Deckfläche als Sieb ausgeführt ist und die Trennfläche bildet. Bild 11 zeigt einen typischen Hordenschüttler mit fünf Einzelhorden, wie er in konventionellen Mähdreschern mit Tangentialdreschwerk eingebaut wird.

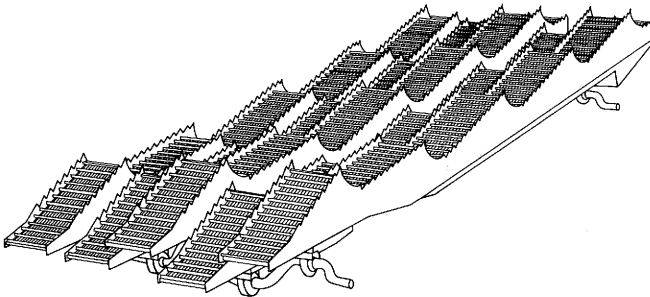


Bild 11: Hordenschüttler eines konventionellen Mähdreschers mit Tangentialdreschwerk.

Die Trennfläche einer Einzelhorde ist in Längsrichtung in mehrere stufenförmige Segmente gegliedert, an deren Ende jeweils eine Fallstufe liegt, die eine Verbesserung der Strohauflockerung bewirken soll. Die zackenförmigen Bleche an den Hordenrändern

stellen eine formschlüssige Verbindung der Horden mit dem Strohaufwerk her und unterstützen dadurch die Schrittförderung durch die Horden.

Ausgehend von diesen gemeinsamen Merkmalen unterscheiden sich die Schüttler verschiedener Hersteller und Typen in ihrer Detailgestaltung erheblich. Bei den Antriebsparametern variieren Erregeramplituden und -frequenzen. Daneben werden Kurbelwellen mit unterschiedlichen Kröpfungswinkelfolgen verwirklicht. Die Breite der Einzelhorden und damit die Anzahl der Horden ist ebenso unterschiedlich wie die Zahl der Fallstufen und die Gesamtlänge der Horden. Außerdem gibt es geschlossene Horden, die die abgetrennten Körner innerhalb jeder Einzelhorde zum Vorbereitungsboden der Reinigungsanlage führen und Schüttler mit offenen Horden, die die abgetrennten Körner auf einen gemeinsamen Rücklaufboden zurückführen. Jede Bauart hat individuelle Vor- und Nachteile, die bei verschiedenen Herstellern unterschiedlich gewichtet werden. Für die Betrachtung weiterer Einzelheiten sei auf Kanafojski [55] und Wacker [5] verwiesen.

4.2.1.2 Kornströme im Mähdrescher

Wie bereits erwähnt, wird zur Leistungsdefinition der Trennprozesse im Mähdrescher die Durchsatz/Verlust-Kennlinie des betreffenden Trennprozesses verwendet. Der Kornverlust ist dabei eine Funktion des Massendurchsatzes und wird dimensionslos oder als Prozentwert relativ zum gesamten Kornmassendurchsatz des Mähdreschers angegeben. Zu den einzelnen Trennprozessen gelangen jedoch nur Teilströme des gesamten Kornmassenstromes, so daß bei der Verlustangabe der über das Ende des Trennelementes hinaus geförderte Verlustkornmassenstrom nicht auf die Eingangsgröße des betreffenden Trennprozesses bezogen wird. Zur Klärung der Zusammenhänge sollen die Kornmassenströme im Mähdrescher kurz dargestellt werden, Bild 12.

Der im Gesamtmassenstrom enthaltene Kornmassenstrom $\dot{m}_{K ges}$ wird im Dreschwerk geteilt. Durch den Dreschkorb hindurch tritt der Kornmassenstrom $\dot{m}_{K D}$ und gelangt auf den Vorbereitungsboden der Reinigungsanlage. Zur Korn/Stroh-Trennung gelangt der Teilmassenstrom $\dot{m}_{K Tr}$, der sich in Folge der Kornabscheidung auf dem Schüttler bis zum

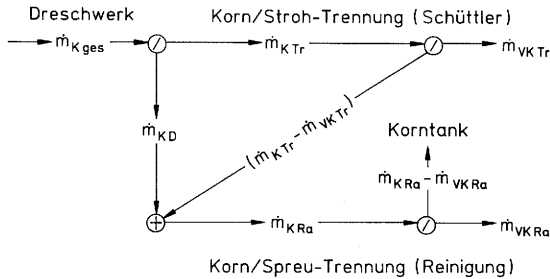


Bild 12: Kornmassenströme im Mähdrescher.

Ende der Trennelemente auf den Kornmassenstrom $\dot{m}_{VK Tr}$ verringert. Dieser Kornmassenstrom wird über das Ende der Trennelemente hinaus transportiert und verursacht einen Kornverlust. Der Differenzmassenstrom zwischen den Teilmassenströmen am Anfang und am Ende des Schüttlers ($\dot{m}_{K Tr} - \dot{m}_{VK Tr}$) gelangt über Rückföhreinrichtungen auf den Vorbereitungsboden der Reinigungsanlage und vereinigt sich dort mit den durch den Dreschkorb hindurchtretenden Kornmassenstrom $\dot{m}_{KD}$ zum Kornmassenstrom der Reinigungsanlage $\dot{m}_{KR a}$, wobei die Beziehung (4) gilt.

$$\dot{m}_{KR a} = \dot{m}_{KD} + \dot{m}_{K Tr} - \dot{m}_{VK Tr} \quad (4)$$

Dies ist der Eingangskornmassenstrom der Reinigungsanlage, der sich durch die Kornabscheidung bis zum Ende auf den Verlustkornmassenstrom der Reinigungsanlage $\dot{m}_{VK Ra}$ vermindert. Die abgeschiedene Kornmasse gelangt in den Korntank.

Betrachtet man jeweils die Anfangs- und Endkornmassenströme, so lassen sich zur Beschreibung der Arbeitsqualität der einzelnen Trennprozesse Quotienten angeben, die einem Wirkungsgrad entsprechen. Wacker [56] verwendet für den Wirkungsgrad von Dresch- und Trennelementen auch den Begriff Effizienz.

Für den Dreschwerkwirkungsgrad gilt

$$\eta_D = \frac{m_{KD}}{\dot{m}_{Kges}} = 1 - \frac{m_{KTr}}{\dot{m}_{Kges}} \quad (5)$$

Entsprechend wird der Wirkungsgrad der Korn/Stroh-Trennung ausgedrückt durch

$$\eta_{Tr} = \frac{m_{KTr} - m_{VKTr}}{\dot{m}_{KTr}} = 1 - \frac{m_{VKTr}}{\dot{m}_{KTr}} \quad (6)$$

Der Wirkungsgrad der Reinigungsanlage ergibt sich zu

$$\eta_{Ra} = \frac{m_{KR a} - m_{VKRa}}{\dot{m}_{KR a}} = 1 - \frac{m_{VKRa}}{\dot{m}_{KR a}} \quad (7)$$

Bei diesen Betrachtungen sind der Überkehrmassenstrom und die Ausdruschverluste vernachlässigt (vgl. Kapitel 1).

Die Kornverluste der Trennelemente lassen sich damit als mehrstellige Funktionen aus den Wirkungsgraden der einzelnen Prozesse darstellen. Für den Kornverlust der Korn/Stroh-Trennung gilt

$$V_{KTr} = \frac{m_{VKTr}}{\dot{m}_{Kges}} \cdot 100\% = (1 - \eta_D) \cdot (1 - \eta_{Tr}) \cdot 100\% \quad (8)$$

und für den Kornverlust der Korn/Sprenu-Trennung gilt

$$V_{KR a} = \frac{m_{VKRa}}{\dot{m}_{Kges}} \cdot 100\% = (\eta_D + \eta_{Tr} \cdot (1 - \eta_D)) \cdot (1 - \eta_{Ra}) \cdot 100\% \quad (9)$$

Der Kornverlust der Korn/Stroh-Trennung ist demnach eine Funktion des Dreschwerk - und des Schüttlerwirkungsgrades. In Bild 13 ist diese Abhängigkeit graphisch dargestellt.

Die Zuordnung der Wirkungsgrade von Dreschwerk und Schüttler ist dabei nicht beliebig, da beide ihrerseits Funktionen des NKB-Massendurchsatzes sind. Der Definitionsbereich der zweistelligen Kornverlustfunktion wird dadurch eingeschränkt. Typische Verläufe der Wirkungsgrade über dem NKB-Massendurchsatz sind in Bild 14 für ein Tangentialdreschwerk und in Bild 15 für den dazugehörigen Horschüttler nach Ergebnissen von Wacker [56] dargestellt.

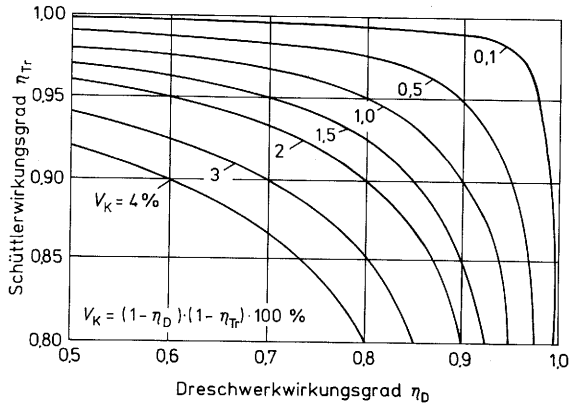


Bild 13: Kornverlust der Korn/Stroh-Trennung als Funktion des Dreschwerk- und des Schüttlerwirkungsgrades.

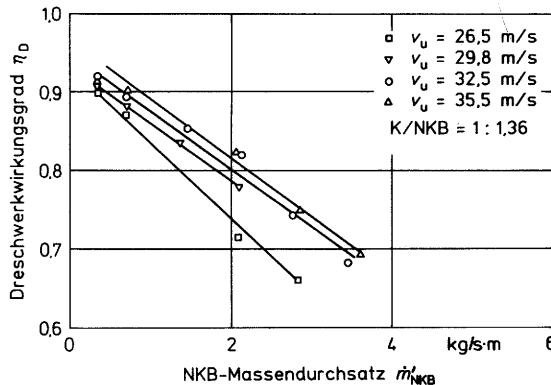


Bild 14: Wirkungsgrad eines Tangentialdreschwerkes als Funktion des NKB-Massendurchsatzes und der Umfangsgeschwindigkeit der Dreschtrommel v_u .

Während der Dreschwerkwirkungsgrad mit dem NKB-Durchsatz ungefähr linear abnimmt, erkennt man beim Schüttlerwirkungsgrad eine deutliche Leistungsgrenze, nach deren überschreiten der Wirkungsgrad stark abfällt. Aus dem Zusammenwirken beider Effekte erklärt sich der starke Verlustanstieg der Korn/Stroh-Trennung beim konventionellen Mähdrescher mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler.

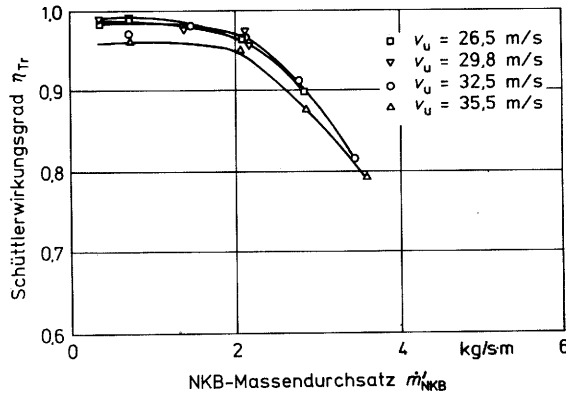


Bild 15: Wirkungsgrad eines Hordenschüttlers als Funktion des NKB-Massendurchsatzes und der Umfangsgeschwindigkeit der Dresch-trommel v_u .

Der Kornverlust der Korn/Stroh-Trennung (Trennverlust) wird bei der Leistungsmessung am Mähdrescher durch die Bestimmung des Verlustkornmassenstromes $\dot{m}_{VK\ Tr}$ und Bezug auf den Gesamtkornmassendurchsatz $\dot{m}_{K\ ges}$ ermittelt. Die Leistung des Trennprozesses auf dem Schüttler wird damit durch eine Meßgröße dargestellt, die nicht ausschließlich vom Betriebsverhalten des zu beurteilenden Trennelementes abhängig ist. Da aber der Dreschwerkwirkungsgrad mit steigendem NKB-Massendurchsatz etwa linear abnimmt und der Schüttlerwirkungsgrad zunächst konstant bleibt und dann überproportional sinkt, ist diese Definition sinnvoll und zulässig, da der überproportionale Verlustanstieg im wesentlichen durch das starke Absinken des Schüttlerwirkungsgrades verursacht wird.

4.2.1.3 Kornabscheide- und Kornrestfunktion

Die bisher beschriebenen Trennprozeßwirkungsgrade erlauben lediglich eine Aussage über das Endergebnis eines Trennprozesses. Um detailliertere Aussagen über einen Trennprozeß machen zu können, ist die Betrachtung des gesamten Prozeßverlaufes über der Trennelementlänge erforderlich. Dazu wird die Kornabscheidefunktion eingeführt.

Die je Zeit- und Flächeneinheit bei der Korn/Stroh-Trennung abgetrennte Kornmasse ist eine stetige Funktion der Trennelementlänge. Diese Kornabscheidefunktion enthält bereits alle Informationen über den Trennprozeß. Bild 16 zeigt qualitativ den typischen Verlauf der Kornabscheidefunktion über der Länge des Trennelementes.

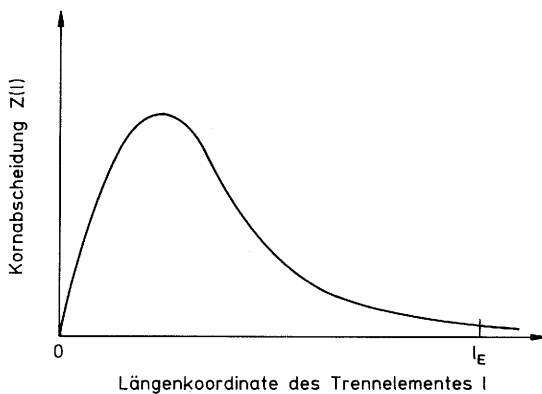


Bild 16: Qualitativer Verlauf der Kornabscheidefunktion $Z(l)$ über der Trennelementlänge.

Die Fläche unter der Kornabscheidefunktion, also das bestimmte Integral von $l=0$ bis zu einer beliebigen Längenkoordinate l_i , ist ein Maß für den bis zu dieser Längenkoordinate bereits durch die Trennfläche hindurchgetretenen Kornmassenstrom.

Die sogenannte Kornrestfunktion $R(l)$ ergibt sich aus der Differenz des auf das Trennelement gelangenden Kornmassenstromes $\dot{m}_0$ und dem oben beschriebenen Integral. Sie gibt die Größe des an einer bestimmten Längenkoordinate noch oberhalb der Trennfläche befindlichen Kornteilmassenstromes an. Der Wert der Kornrestfunktion $r(0)$ am Beginn des Trennelementes ist demnach gleich dem vom Dreschwerk auf das Trennelement gelangenden Kornmassenstrom $\dot{m}_{K \text{ Tr}}$. Am Ende des Trennelementes entspricht der Wert der Kornrestfunktion dem Verlustkornmassenstrom $\dot{m}_{VK \text{ Tr}}$. Bild 17 zeigt den qualitativen Verlauf der Kornrestfunktion über der Länge des Trennelementes.

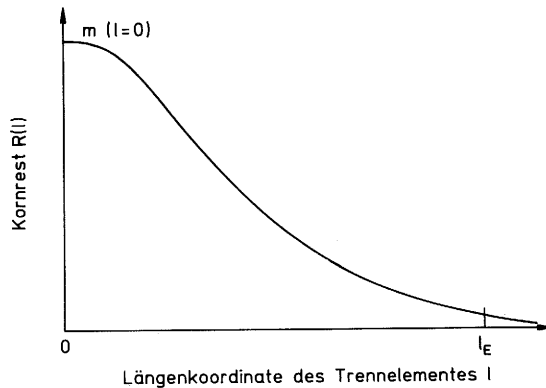


Bild 17: Qualitativer Verlauf der Kornrestfunktion $R(l)$ über der Trennelementlänge.

Erkenntnisse über den Verlauf der Kornabscheide- bzw. Kornrestfunktion wurden vor allem aus experimentellen Untersuchungen des Abscheideverhaltens von Schüttlern gefunden. Mathematische Beschreibungen der beiden Funktionen beschränken sich dabei häufig auf den Kurvenverlauf rechts der Wendepunkte, da dann meist eine einfache Exponentialfunktion zur Beschreibung des Vorganges ausreicht. Bei Böttinger [57] sind die wichtigsten dieser Untersuchungen zusammenfassend dargestellt. Während die meisten mathematischen Beschreibungen lediglich aus Kurvenanpassungen an experimentelle Ergebnisse entstehen, leitet Glaser [58] die Abscheidefunktion aus einer physikalischen Modellvorstellung her. Eine vollständige mathematische Beschreibung der Abscheidefunktion über der gesamten Länge des Trennelementes gelingt aber erst Böttinger [59]. Er verwendet für die Herleitung der Abscheidefunktion ebenfalls eine physikalische Modellvorstellung. Seine Funktionsgleichung der Kornabscheidefunktion $Z(l)$ ist in Gl.(10), die der Kornrestfunktion $R(l)$ in Gl.(11) wiedergegeben. Die Gültigkeit dieser Funktionsgleichungen wurde von Böttinger [59] in zahlreichen Versuchen nachgewiesen.

$$Z(l) = -m_0 \cdot \frac{(a \cdot b)}{(b-a)} \cdot l^c \cdot \left(\exp\left(\frac{-b}{c+1} \cdot l^{(c+1)}\right) - \exp\left(-\frac{a}{c+1} \cdot l^{(c+1)}\right) \right) \quad (10)$$

$$R(l) = m_0 \cdot \frac{l}{(b-a)} \cdot \left(b \cdot \exp\left(\frac{-a}{c+1} \cdot l^{(c+1)}\right) - a \cdot \exp\left(-\frac{b}{c+1} \cdot l^{(c+1)}\right) \right) \quad (11)$$

Trotz der Herleitung über eine physikalische Modellvorstellung, ist der Charakter der Gleichungen lediglich beschreibend. Die Parameter (a,b,c) der Funktionen haben keine direkte physikalische Bedeutung, sondern sind lediglich Regressionskonstanten.

Die Kornabscheide- bzw. die Kornrestfunktion enthalten bereits alle Informationen über den Trennprozeß. Ihr Verlauf hängt damit von allen in Bild 3 genannten Einflußgrößen und damit auch von den Stoffeigenschaften des Erntegutes ab. Die Ermittlung einer Kornabscheide- oder Kornrestfunktion mit einem technologischen Meßverfahren, bei dem alle Einflußgrößen, mit Ausnahme der Stoffeigenschaften, konstant gehalten werden, ergibt deshalb eine Möglichkeit den Einfluß der Stoffeigenschaften auf den Verlauf der Funktionen zu isolieren. Ein geeigneter Kennwert der Kornabscheide- oder Kornrestfunktion, muß also die Abbildung des Stoffeigenschaftseinflusses auf einen sehr komplexen Trennprozeß in eine meßbare, technologische Stoffeigenschaft erlauben.

Ein geeignetes Meßverfahren für diese technologische Stoffeigenschaft ergibt sich aus der Betrachtung des Trennprozesses als zeitabhängigen Vorgang. Da für den Trennvorgang nur die Vertikal-komponente der Trennflächenbewegung wesentlich ist, ist die Einwirkungszeit der schwingenden Trennfläche auf das zu trennende Haufwerk die eigentliche, für den Trennerfolg maßgebliche, unabhängige Variable. Die Länge des Hordenschüttlers wird deshalb so gewählt, daß unter Berücksichtigung der aus der horizontalen Bewegungskomponente resultierenden Fördergeschwindigkeit, eine ausreichende Einwirkungszeit für den Trennvorgang entsteht. Die Transformation zwischen beiden unabhängigen Variablen, Zeit t und Länge l, erfolgt über die Fördergeschwindigkeit. Wie das nach Ergebnissen von Meier [60] erstellte Bild 18 zeigt, hängt die Fördergeschwindigkeit, außer von der Konstruktion, ebenfalls von den Stoffeigenschaften ab. Im Bereich der üblicherweise verwirklichten

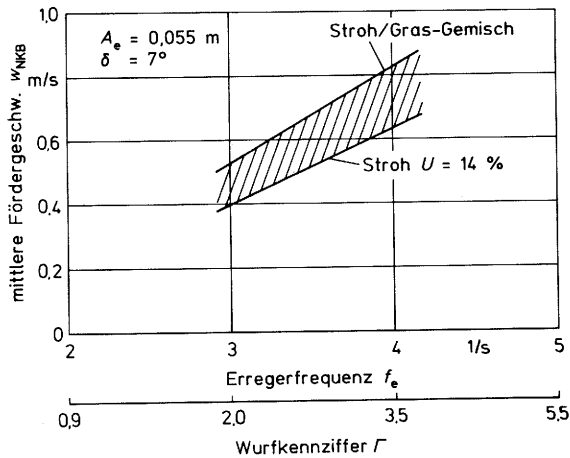


Bild 18: NKB-Fördergeschwindigkeit auf dem Hordenschüttler nach [60]. δ = Neigungswinkel der Trennfläche, A_e = Erregeramplitude.

Wurfkennziffern $\Gamma \approx 2$, kann sie jedoch in erster Näherung als konstant betrachtet werden. Die obere Grenzkurve in Bild 18 stellt extreme Werte dar, die in der Praxis kaum erreicht werden. Die tatsächliche Fördergeschwindigkeit liegt nach Meier [60], für in der Praxis vorkommenden Fälle, in der Nähe der unteren Grenzkurve.

4.2.2 Entmischungsversuch

Um Aussagen über den Entmischungsvorgang machen zu können, genügt es die Kornabscheidung als zeitabhängige Größe zu betrachten. Diese Tatsache wurde bereits von Meier [60], Baader et al. [54] und Huismann [41] erkannt. Sie setzten zur Untersuchung von grundsätzlichen Zusammenhängen am Schüttler jeweils einen Prüfstand nach dem in Bild 19 dargestellten Funktionsschema ein. Ein strohgefüllter Versuchsgutbehälter (e) wird von einem Getriebe (i) in sinusförmige Vertikalschwingungen versetzt. Auf das schwingende Strohhaufwerk (d) wird aus einem Vorratsbehälter (a) mit Hilfe eines Spalt- oder Jalousiebodens (b, c) eine definierte Kornmasse aufgegeben. Infolge der Schwingbewegung kommt es in der Strohschicht zu einem Entmischungsvorgang bei dem die Körner zur

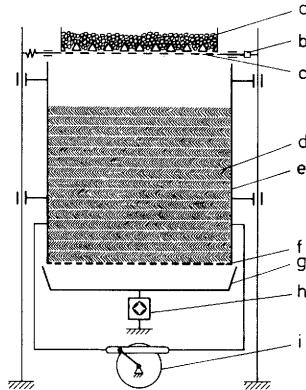


Bild 19: Funktionsprinzip des Entmischungsprüfstandes.

Trennfläche (f) gelangen, an der sie abgeschieden werden. Die durch die Trennfläche hindurchtretenden Körner werden in einer Waagschale (g) aufgefangen. Die durchgefallene Kornmasse wird von der Waage (h) bestimmt. Eine parallel zur Wägung durchgeführte Zeitmessung erlaubt die Ermittlung von einzelnen Punkten einer Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$. Die Korndurchgangsfunktion entspricht der in Bild 17 dargestellten Kornrestfunktion $R(l)$, wobei statt des noch oberhalb der Trennfläche befindlichen Kornmassenstromes $\dot{m}(l)$ die absolute abgeschiedene Kornmasse $m(t)$ über der Zeit t aufgetragen ist, Bild 20. Der Kornmassenstrom am realen Schüttler geht beim Entmischungsversuch in eine absolute Masse und die Längenkoordinate l in eine Zeitkoordinate t über. Eine mathematische Beschreibung der Korndurchgangsfunktion erhält man aus der Gleichung für die Kornabscheidefunktion (10) durch Transformation in den Zeitbereich. Die Längenkoordinate l wird dabei durch die Zeit t ersetzt. Anschließend wird das unbestimmte Integral nach der Zeit t gebildet. Durch Bezug auf die Anfangskornmasse m_0 ergibt sich die normierte und dimensionslose Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$. Die Gleichung der Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ ist in Gl.(12) wiedergegeben.

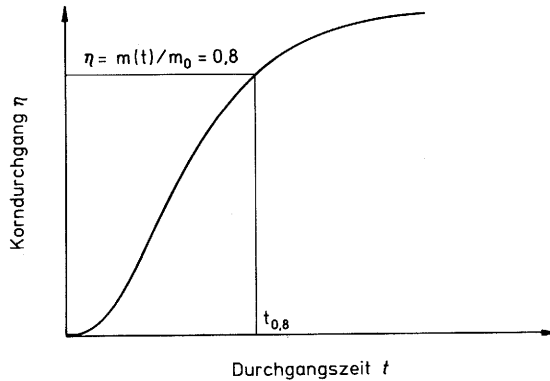


Bild 20: Qualitativer Verlauf der Korndurchgangsfunktion.

$$\eta(t) = 1 - \frac{t \cdot b}{(b-a)} \cdot \exp\left(\frac{-a}{c+t} \cdot t^{(c+t)}\right) - \frac{t \cdot a}{(b-a)} \cdot \exp\left(\frac{-b}{c+t} \cdot t^{(c+t)}\right) \quad (12)$$

Um zu einer mathematischen Beschreibung der Korndurchgangsfunktion zu gelangen, kann der Entmischungsversuch auch als Realisierung eines Übertragungssystems aufgefaßt werden. Das Verhalten der schwingenden Strohschicht bestimmt dabei das Übertragungsverhalten. Die gleichzeitige Aufgabe der gesamten Kornmasse wird als Einheitssprung der Eingangsgröße aufgefaßt. Die Ausgangsgröße bildet die auf die Waagschale gelangte Kornmasse. Der zeitliche Verlauf der Kornmasse auf der Waagschale ist also die Sprungantwort des Systems, die als Übergangsfunktion dargestellt werden kann.

Das Übertragungsverhalten der schwingenden Strohschicht entspricht einem proportionalen System mit Verzögerung zweiter Ordnung (P_{T2} -Glied).

Die Gleichung der Übertragungsfunktion ergibt sich als Lösung der Schwingungsdifferentialgleichung

$$T_2^2 \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \cdot \frac{dy}{dt} + y = c \cdot x(t) \quad (13)$$

Wobei das inhomogene Glied $x(t)$ durch die Sprungfunktion

$$x(t) = h(t) = \begin{cases} 1 & \text{für } t > 0 \\ 0 & \text{für } t = 0 \end{cases} \quad (14)$$

ersetzt wird.

Auf die Ableitung der Übergangsfunktion soll nicht ausführlich eingegangen werden. Die charakteristische Gleichung führt auf die Lösungen

$$\lambda_{1,2} = -\delta \pm \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1} \quad (15)$$

wobei

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{T_1}{2 \cdot T_2^2} && (\text{Abklingkonstante}) \\ \omega_0 &= \frac{1}{T_2} && (\text{Kreisfrequenz der ungedämpften Schwingung}) \\ D &= \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{T_1}{2 \cdot T_2} && (\text{Dämpfungsmaß}) \end{aligned} \quad (16)$$

sind.

Im hier interessierenden aperiodischen Fall muß das Dämpfungsmaß D größer als 1 sein.

Unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen ist die Lösung der Differentialgleichung in Gl. (17) dargestellt. Diese Gleichung enthält drei Parameter (δ , ω_0 , und D), die aber auf die in der ursprünglichen Differentialgleichung enthaltenen zwei Zeitkonstanten T_1 und T_2 zurückgeführt werden können. Der dritte Parameter entsteht aus der Bedingung Dämpfungsmaß $D > 1$.

$$\begin{aligned}
 m(t) = & \frac{-(\delta + \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1})}{2 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1}} \cdot \exp((-\delta + \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1}) \cdot t) \\
 & + \frac{(\delta - \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1})}{2 \cdot \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1}} \cdot \exp((-\delta - \omega_0 \cdot \sqrt{D^2 - 1}) \cdot t) \\
 & + 1
 \end{aligned} \tag{17}$$

Die Kurvengleichungen (12) und (17) geben damit zwar den gesamten Verlauf des Trennprozesses wieder, können aber wegen ihrer Komplexität als solche nicht ohne weiteres als Kennwert für das Ergebnis des Entmischungsversuches verwendet werden. Da die Parameteranzahl der Gleichungen größer als eins ist und die Parameter keine physikalische Bedeutung haben, kommen auch sie nicht als Kennwerte in Frage. Bereits Baader et al. [54] verwenden deshalb die Zeit bei der 80 % der aufgegebenen Kornmasse abgeschieden sind, als technologischen Kennwert für den Erfolg des Trennvorganges, Bild 20. Der gesamte Verlauf der Korndurchgangsfunktion und damit der Verlauf des Trennvorganges werden dadurch in einem einzigen, einfach zu handhabenden Kennwert zusammengefaßt. Die Verwendung des Wertes der Durchgangszeit bei 80 % Korndurchgang ist willkürlich, aber sinnvoll. Zum einen kann empirisch nachgewiesen werden, daß spätestens ab diesem Korndurchgang der weitere Verlauf der Korndurchgangsfunktion durch einen einfachen exponentiellen Zusammenhang beschrieben wird, der weitere Kurvenverlauf also hinreichend genau durch die Angabe eines einzelnen Kurvenpunktes beschrieben wird, zum anderen verläuft die Korndurchgangsfunktion in diesem Bereich noch relativ steil, so daß der Schnittpunkt zwischen Kurve und 80% - Linie exakt bestimmt werden kann.

Freye [61] verwendet bei seinen Versuchen zur Kennzeichnung des Reinigungserfolges ebenfalls einen Kennwert, bei dem 80 % des aufgegebenen Kornmassenstromes abgeschieden sind. Da er Versuche an einer kontinuierlich arbeitenden Anlage durchführte, verwendete er statt der Durchgangszeit $t_{0,8}$ die Durchgangslänge $l_{0,8}$.

4.2.2.1 Einflüsse auf die Korndurchgangsfunktion

Die Grundlagen des Entmischungsvorganges bei Haufwerken großer Schichtdicke wurden vor allem von Baader et al. [54] erarbeitet. Ausgehend von der Erkenntnis, daß sowohl die im Haufwerk wirkenden Beschleunigungen als auch die Haufwerksauflockerung groß sein müssen, um eine optimale Entmischung zu erreichen, stellten sie fest, daß nicht beide Bedingungen gleichzeitig ein Maximum erreichen können. Optimale Entmischungsverhältnisse liegen vielmehr dann vor, wenn beide Größen in einem optimalen Verhältnis zueinander stehen. Dies wird erreicht, wenn die beiden Antriebsparameter Erregeramplitude A_e und Erregerfrequenz f_e in einem optimalen Verhältnis zueinander stehen. Dieses Verhältnis wird durch die Beziehung (18) ausgedrückt.

$$A_e = \frac{g}{4\pi^2} \cdot \frac{\Gamma}{f_e^2} \quad \text{mit } 1 \leq \Gamma \leq 3,3 \quad (18)$$

Die Gültigkeit dieser Beziehung wird von den Autoren sowohl theoretisch als auch experimentell mit einem Entmischungsprüfstand, der dem Funktionsschema in Bild 19 entspricht, nachgewiesen. Der in Bild 21 graphisch dargestellte Zusammenhang Gl.(18) ergab sich dabei sowohl bei ausschließlicher Betrachtung der Strohbewegung, als auch aus den Ergebnissen von Entmischungsversuchen, bei denen die Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ ermittelt wurde. Das Ergebnis der Entmischungsversuche wurde dabei durch die bereits oben beschriebene Durchgangszeit $t_{0,8}$, bei der 80 % der aufgegebenen Kornmasse abgeschieden sind, beschrieben.

Baader et al [54] untersuchten auch den Einfluß der Massenbelegung auf den Verlauf der Korndurchgangsfunktion. Sie fanden dabei, daß die Durchgangszeit $t_{0,8}$ bei steigender Massenbelegung überproportional ansteigt, Bild 22. Bei den Untersuchungen in verschiedenen Versuchsjahren zeigte sich, daß diese Tendenz grundsätzlich auftritt. Infolge veränderter Stoffeigenschaften unterscheiden sich die in Bild 22 eingetragenen Kurven für zwei Versuchsjahre jedoch signifikant. Da weder die Massenbelegung noch die Antriebsparameter verändert wurden, muß der unterschiedliche Kurvenverlauf auf unterschiedliche Stoffeigenschaften zurückzuführen sein.

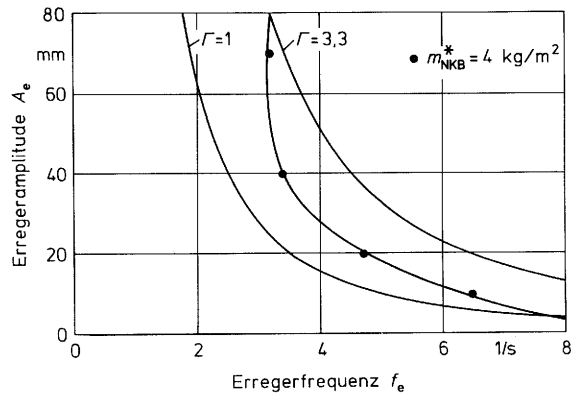


Bild 21: Optimale Zuordnung von Erregerfrequenz f_e und Erregeramplitude A_e beim Entmischungsversuch nach Baader et al. [54].

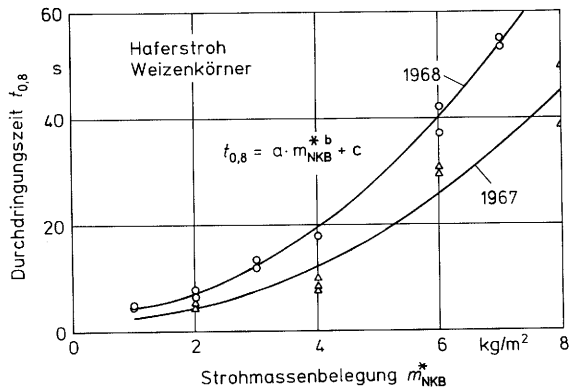


Bild 22: Einfluß der Massenbelegung auf die Durchgangszeit $t_{0,8}$ nach Baader et al. [54].

Die im Entmischungsversuch ermittelte Durchgangszeit $t_{0,8}$ ist also ein Maß für eine technologische Stoffeigenschaft, wenn alle anderen Versuchsparameter konstant gehalten werden.

Huisman [41] verwendete für seine Untersuchungen ebenfalls einen Entmischungsprüfstand nach dem Funktionsprinzip von Bild 19. Der Entmischungsprüfstand wurde hier im Labor anstatt eines Schüttlers eingesetzt, wobei sowohl die Antriebsparameter als auch die Massenbelegung konstant gehalten wurden. Huisman [41] verwendete als Maß für den Entmischungserfolg die Zeit bei der 75 % der aufgegebenen Körner abgeschieden sind. Er weist mit statistischen Methoden nach, daß die einfachen physikalischen Stoffeigenschaften Feuchtegehalt, Gleitreibungszahl, Elastizitätsmodul, Schüttdichte und Größenverteilung des Stroh den Verlauf der Korndurchgangsfunktion und damit die Durchgangszeit $t_{0,75}$ bzw. $t_{0,8}$ beeinflussen. Verwendet man also die Durchgangszeit $t_{0,8}$ selbst als Maß für eine technologische Stoffeigenschaft, so kann der Einfluß von zahlreichen einfachen physikalischen Eigenschaften in einer einzigen Meßgröße zusammengefaßt werden.

Ein Entmischungsversuch eignet sich damit als Meßverfahren zur Bestimmung einer aussagefähigen technologischen Stoffeigenschaft in Bezug auf den Korn/Stroh-Trennprozeß auf dem Schüttler im konventionellen Mähdrescher. Im folgenden wird ein solches Meßverfahren beschrieben, wobei als "Meßgerät" ein Prüfstand verwendet wird, dessen Funktionsprinzip ebenfalls dem in Bild 19 dargestellten entspricht und dessen Antriebsparameter nach den Ergebnissen von Baader et al [54] für eine optimale Entmischung (= Durchgangszeit minimal) gewählt wurden. Massenbelegung, Erregerfrequenz und Erregeramplitude werden zur Isolierung des Stoffeigenschaftseinflusses konstant gehalten. Die gemessene technologische Stoffeigenschaft entspricht der Durchgangszeit $t_{0,8}$ und wird im folgenden als Durchdringungszeit $t_{0,8}$ bezeichnet.

4.2.2.2 Zusammenhang zwischen Durchdringungszeit und Schüttlerleistung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Meßverfahren zu finden, das aus der Messung einer Stoffeigenschaft einen Rückschluß auf die zugehörige Trennprozeßleistung im Mähdrescher erlaubt. Dazu ist es erforderlich, den Zusammenhang zwischen Änderungen der technologischen Stoffeigenschaft Durchdringungszeit $t_{0,8}$ und Änderungen der Trennprozeßleistung eines Vergleichs- oder Versuchsmähdreschers experimentell zu ermitteln.

Daß ein solcher Zusammenhang besteht, wird im folgenden anhand von Bild 23 erläutert.

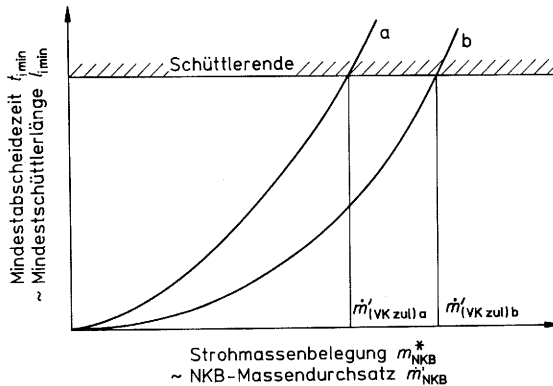


Bild 23: Zusammenhang zwischen möglichem NKB-Massendurchsatz bei einem vorgegebenen Verlustniveau und der durch die Stoffeigenschaften bestimmten Mindestabscheidelänge für zwei Stoffzustände.

Dargestellt ist der qualitative Zusammenhang zwischen der Strohmassenbelegung und einer fiktiven Mindestabscheidezeit, die einen noch zulässigen Kornverlust des Prozesses markiert. Auf den kontinuierlichen Trennprozeß übertragen, entspricht die Strohmassenbelegung m_{NKB}^* dem (breitenbezogenen) NKB-Massendurchsatz $\dot{m}_{\text{NKB}}$ und die Mindestabscheidezeit $t_{\min}$ derjenigen Schüttlerlänge $l_{\min}$, bei

der gerade der zulässige Kornverlust erreicht bzw. unterschritten wird. Die Kurven a und b stellen diesen Zusammenhang für zwei verschiedene Stoffzustände dar. Die Schnittpunkte der Kurven mit der Linie des realen Schüttlerendes liefern auf der Abszisse zwei Massendurchsätze, die dem Grenzdurchsatz und damit der Trennprozeßleistung entsprechen. Unter der Voraussetzung, daß die fiktive Mindestabscheidezeit direkt proportional zur Durchdringungszeit $t_{0,8}$ ist, gilt dieser Zusammenhang auch für die Durchdringungszeit und die Schüttlerleistung. Der Zusammenhang zwischen Durchdringungszeit $t_{0,8}$ und Schüttlerleistung $\dot{m}_{NKB(1\%)}$ ist deshalb linear. Er wird später experimentell nachgewiesen. Dazu werden unabhängig voneinander, aber gleichzeitig, die Trennprozeßleistung eines Versuchsmähdreschers und die Durchdringungszeit bei einer konstanten Massenbelegung unter verschiedenen Ernteguteigenschaften gemessen und Korrelationen zwischen den beiden Werten untersucht.

4.3 Durchströmungseigenschaften

Zur Begründung einer technologischen Stoffeigenschaft im Hinblick auf das Verhalten von Erntegut auf der Reinigungsanlage im Mähdrescher bei Durchströmung mit Luft wird im folgenden zunächst das Phänomen der Fluidisierung einer Feststoffschüttung erläutert. Anschließend werden die Zusammenhänge mit dem Betriebsverhalten der Reinigungsanlage im Mähdrescher aufgezeigt.

4.3.1 Fluidisierung

Unter Fluidisierung versteht man die Überführung einer Feststoffschüttung in einen Zustand, bei dem die Bewegungsmöglichkeiten der Einzelteilchen soweit erhöht sind, daß sich die Feststoffschüttung flüssigkeitsähnlich verhält. Eine Feststoffschüttung wird dazu senkrecht mit zunehmender Fluidgeschwindigkeit durchströmt bis die anfängliche Ruheschüttung in eine Wirbelschicht übergeht. In diesem fluidisierten Zustand bleibt der Druckabfall in der Schüttung bei weiter zunehmender Fluidgeschwindigkeit bis zum Erreichen der pneumatischen Förderung konstant, Bild 24.

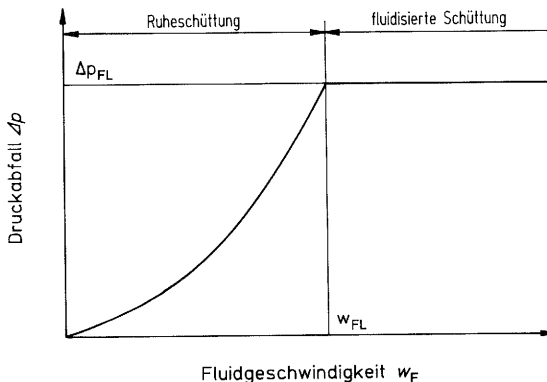


Bild 24: Druckabfall in einer Feststoffschüttung (Fluidisierungskurve). Δp_{FL} = Fluidisierungsdruckabfall. w_{FL} = Fluidisierungsgeschwindigkeit.

Leva [62] und Reh [63] stellen Anwendungen der Fluidisierung aus dem Bereich der technischen Chemie zusammen. Keuneke [64] und Zabeltitz [65] berichten über Anwendungen aus dem Bereich der Landtechnik. Im folgenden werden einige wichtige Begriffe erläutert.

Unter einer Feststoffschüttung soll im folgenden ein Teilchenhaufwerk verstanden werden, das sich in einem Behälter mit festen senkrechten Seitenwänden befindet und eine ebene Oberfläche besitzt. Die Geometrie des zylindrischen oder quaderförmigen Teilchenhaufwerks (Schüttung) wird durch die Behältergrundfläche A_B und durch die Schütthöhe h_{Sch} bestimmt, die zusammen die Berechnung des Schüttvolumens V_{Sch} ermöglichen. Die Masse der Feststoffschüttung ist gleich der Summe der Massen aller Einzelteilchen des Haufwerks. Daraus folgt die Definition der Schüttdichte

$$\rho_{Sch} = \frac{\sum m_i}{V_{Sch}} \quad (19)$$

Das Feststoffvolumen V_S ist der Teil des Schüttvolumens, der mit Feststoff gefüllt ist (keine Berücksichtigung der Hohlräume zwischen den Teilchen des Haufwerks). Die Feststoffdichte ρ_S ist entsprechend die spezifische Masse des Feststoffes (Reindichte, Rohdichte). Mit Hilfe dieser Definitionen läßt sich nach Gl.(20) das relative Hohlraumvolumen ϵ definieren. Diese Größe wird in nahezu allen bekannten Gleichungen zur Berechnung des Druckverlustes sowohl für die Ruheschüttung als auch für die fluidisierte Schüttung (Wirbelschicht) verwendet.

$$\epsilon = 1 - \frac{V_S}{V_{Sch}} = 1 - \frac{\rho_{Sch}}{\rho_S} \quad (20)$$

Die Beziehung (20) erlaubt es mit der üblicherweise während eines Versuches bestimmten Schüttdichte bei bekannter oder annähernd bekannter Feststoffdichte das nur schwer zu messende relative Hohlraumvolumen zu bestimmen.

Unter Fluidgeschwindigkeit w_F soll die auf die Behälterquerschnittsfläche A_B bezogene Geschwindigkeit des strömenden Mediums verstanden werden. Wird die Fluidgeschwindigkeit langsam erhöht,

dann beginnt die anfängliche Ruheschüttung sich ab einer bestimmten Fluidgeschwindigkeit auszudehnen, d.h. das relative Hohlraumvolumen vergrößert sich. Dieser Punkt heißt unterer Fluidisierungspunkt, Ausdehnungspunkt oder Lockerungspunkt, die zugehörige Fluidgeschwindigkeit entsprechend Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} , Ausdehnungsgeschwindigkeit oder Lockerungsgeschwindigkeit. Verringert man umgekehrt aus dem fluidisierten Schüttungszustand heraus die Fluidgeschwindigkeit, so ist die Fluidisierungsgeschwindigkeit diejenige Fluidgeschwindigkeit, bei der die Wirbelschicht gerade noch aufrecht erhalten wird.

4.3.1.1 Berechnungsmöglichkeiten

Die Berechnungsmöglichkeiten für die kennzeichnenden Größen Druckabfall in der Schüttung und Fluidisierungsgeschwindigkeit ergeben sich aus den bekannten Beziehungen für den Druckabfall in Ruheschüttungen und in Wirbelschichten.

Wirbelschicht

Für den fluidisierten Schüttungszustand gilt nach Reh [63], daß die Widerstandskraft der Gasströmung auf die Schüttung gleich dem Gewicht der Summe aller Einzelteilchen des Feststoffes sein muß

$$\Delta p \cdot A_B = A_B \cdot h_{sch} \cdot (1-\epsilon) \cdot (\rho_s - \rho_F) \cdot g \quad (21)$$

Mit der Fluidichte ρ_F und der Feststoffdichte ρ_s ergibt der Ausdruck rechts des Gleichheitszeichens dabei das tatsächliche Gewicht der Feststoffschüttung an.

Ruheschüttung

Für die Berechnung des Druckverlustes eines Fluides bei Durchströmung einer Ruheschüttung in Abhängigkeit von der Fluidströmungsgeschwindigkeit gibt es zahlreiche Ansätze. Keuneke [64] gibt eine zusammenfassende Darstellung der wichtigsten bis dahin bekannten Gleichungen. Für seine Berechnungen verwendet er im Prinzip eine bereits von Ergun u. Orning [66] veröffentlichte Gleichung

$$\Delta p = k_l \cdot v_F \cdot \rho_F \cdot \frac{h_{sch}}{d_s^2} \cdot \frac{(1-e)^2}{e^3} \cdot w_F + k_t \cdot \frac{h_{sch}}{d_s} \cdot \frac{\rho_F}{2} \cdot \frac{(1-e)}{e^3} \cdot w_F^2 \quad (22)$$

Diese Gleichung geht davon aus, daß sich der Druckverlust beim Durchströmen einer Ruheschüttung aus einem von der Viskosität des Fluids und aus einem von kinetischen Effekten bestimmten Anteil zusammensetzt. Entsprechend besteht die Gleichung aus zwei Summanden, die beide auf bekannten theoretischen Zusammenhängen für die Rohrströmung basieren. Im laminaren Anteil (überwiegend viskose Effekte) geht die Strömungsgeschwindigkeit linear ein, während sie im turbulenten Anteil (überwiegend kinetische Stoßverluste) in der zweiten Potenz auftritt.

In der hier angegebenen Form der Gleichung (22) wird mit d_s ein äquivalenter Teilchendurchmesser verwendet, der als Quotient aus dem Volumen und der Oberfläche eines Einzelteilchens berechnet wird. Statt dieses Durchmessers kann auch die volumenbezogene (spezifische) Oberfläche eines Einzelteilchens S in die Gleichung eingesetzt werden. Unter der Annahme der Kugelform gilt dabei $S = 6/d_s$. Die Laminarkonstante k_l wird von Ergun [67] mit 150 und von Leva [62] mit 200 angegeben. Die Turbulenzkonstante wird übereinstimmend mit $k_t = 3,5$ angegeben.

Da am unteren Fluidisierungspunkt sowohl die Gleichung (21) als auch die Gleichung (22) gültig sind, kann die Fluidgeschwindigkeit am unteren Fluidisierungspunkt berechnet werden, indem man die jeweils rechts stehenden Gleichungsteile gleich setzt.

Aus Gl.(21) und Gl.(22) folgt demnach für den Bereich laminarer Strömungen unter Vernachlässigung des Turbulenzgliedes in Gl.(22) Gl.(23) für die Fluidisierungsgeschwindigkeit.

$$w_{FL} = \frac{d_s^2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_F)}{k_l \cdot v_F \cdot \rho_F} \cdot \frac{e^3}{(1-e)} \quad (23)$$

Für den turbulenten Bereich gilt unter Vernachlässigung des Laminargliedes in Gl.(22) Gl.(24) für die Fluidisierungsgeschwindigkeit.

$$w_{FL} = \sqrt{\frac{d_s \cdot 2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_F) \cdot \epsilon^3}{k_t \cdot \rho_F}} \quad (24)$$

Im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung müssen beide Summanden berücksichtigt werden. Dazu wird die in w_{FL} quadratische Gleichung (22) nach der Lösungsformel gelöst. Man erhält dann die Beziehung (25) für die Fluidisierungsgeschwindigkeit.

$$w_{FL} = \sqrt{\left(\frac{k_l \cdot v_F \cdot (1-\epsilon)}{k_t \cdot d_s} \right)^2 + \frac{d_s \cdot 2 \cdot g \cdot (\rho_s - \rho_F) \cdot \epsilon^3}{k_t \cdot \rho_F}} - \frac{k_l \cdot v_F \cdot (1-\epsilon)}{k_t \cdot d_s} \quad (25)$$

Welche der Gleichungen (23), (24) oder (25) angewandt werden kann, hängt vom Strömungszustand ab, der durch die auf ein Einzelteilchen bezogene Reynoldszahl Re charakterisiert wird. Während für die Rohrströmung bei einer Reynoldszahl von $Re_{krit} = 2320$ die Laminarströmung in eine turbulente Strömung übergeht, erfolgt dieser Übergang bei der Durchströmung von Schüttungen bei sehr viel kleineren Reynoldszahlen. Keuneke [64] gibt die Grenze für die Laminarströmung nach Gl.(26) bei $Re \approx 1$ an.

$$Re = \frac{w_F \cdot d_s}{v_F} \quad (26)$$

Zabeltitz [65] nennt nach Leva [62] einen Wert von $Re = 10$ für das obere Ende des Laminarbereiches und damit für die Gültigkeitsgrenze von Gleichung (23). Reh [63] verwendet die Gleichung (23) für die Laminarströmung von $Re = 0,001$ bis $Re = 20$ und ab $Re = 100$ bis $Re = 4000$ die Gleichung (24) für die turbulente Strömung. Im Zwischenbereich muß die Gleichung (25) für die Übergangsströmung angewandt werden.

Wegen des in der Praxis bei nicht kugelförmigen Schüttgutteilchen nur schwer zu bestimmenden äquivalenten Durchmessers d_s und wegen des meist unbekannten relativen Hohlraumvolumens ϵ am Fluidisierungspunkt, kann die tatsächliche Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} mit den gezeigten Gleichungen nur ungenau berechnet werden. Schon Ergun u. Orning [66] weisen auf die Möglichkeit hin, den äquivalenten Kugeldurchmesser und das relative Hohlraumvolumen

dadurch zu bestimmen, daß man die Fluidisierungsgeschwindigkeit einer Schüttung mißt und dann in die bekannten Beziehungen einsetzt. Reh [63] nennt eine Standardabweichung von $\pm 34\%$, wenn tatsächlich gemessene und vorausberechnete Fluidisierungsgeschwindigkeiten verglichen werden. Nach Werther [68] muß man mit einem mittleren relativen Fehler von 25% für die vorausberechnete Fluidisierungsgeschwindigkeit rechnen. Für die Auslegung von Wirbelschichten empfiehlt er deshalb, die Fluidisierungsgeschwindigkeit des vorgesehenen Schüttgutes experimentell zu bestimmen (vgl. auch [69]). Um im Experiment Meßwerte für die Fluidisierungsgeschwindigkeit zu erhalten, die auf den technischen Maßstab übertragbar sind, ist es nach Werther [70] wichtig relativ große Versuchsgutbehälter zu verwenden, da erst ab Behälterdurchmessern von mehr als 0,5 m die gemessene Fluidisierungsgeschwindigkeit unabhängig von der Behältergröße wird.

Die Stoffeigenschaften der Schüttung können damit durch Messung der Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} charakterisiert werden. Die Fluidisierungsgeschwindigkeit ist also im Sinne der Definition in Kapitel 2 eine technologische Stoffeigenschaft. Darauf beruht der Gedanke, durch einen Fluidisierungsversuch Rückschlüsse auf durch Stoffeigenschaftsänderungen hervorgerufene Leistungsänderungen der Reinigungsanlage im Mähdrescher zu ziehen.

4.3.1.2 Reale Schüttungen

Bei idealem Verhalten hat die Fluidisierungskurve einer Schüttung beim Übergang von der Ruheschüttung in den Bereich der fluidisierten Schüttung eine Unstetigkeitsstelle am Fluidisierungspunkt. Der Zusammenhang zwischen Fluidgeschwindigkeit w_F und Druckabfall in der Schüttung Δp geht von einer Potenzfunktion nach Gleichung (22) in eine konstante Funktion nach Gleichung (21) über. Die auf den Behälterquerschnitt bezogene Fluidgeschwindigkeit an der Unstetigkeitsstelle ist die Fluidisierungsgeschwindigkeit.

Reale Schüttungen besitzen stets einen Übergangsbereich zwischen Ruheschüttung und fluidisierter Schüttung. Die Potenzfunktion der Ruheschüttung geht dabei stetig in den Bereich konstanten Druckabfalles über. Die Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} ist dann vereinbarungsgemäß die Fluidgeschwindigkeit am Schnittpunkt der extrapo-

lierten Funktionen für die Ruheschüttung und für die fluidisierte Schüttung, Bild 25.

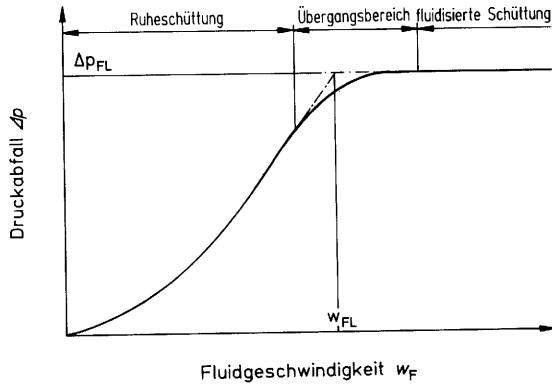


Bild 25: Bestimmung der Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} bei realen Schüttungen.

Die Ausbildung des Kurvenverlaufes im Übergangsbereich hängt von den Eigenschaften der Schüttung ab. Leva [62] und Keuneke [64] beschreiben das Verhalten von vier Schüttungstypen. Die entsprechenden Fluidisierungskurven sind in Bild 26 nach Keuneke [64] dargestellt. Statt der logarithmischen Achsenteilung im Original wurden lineare Achsenteilungen verwendet. Das Verhalten von Korn- und Spreuschüttungen entspricht etwa dem Typ b

Nach Werther [68] soll die Fluidisierungskurve einer Schüttung so aufgenommen werden, daß die Fluidgeschwindigkeit aus dem Bereich der fluidisierten Schüttung heraus langsam verringert wird. Nach Bild 26a wird auf diese Weise die obere Fluidisierungsgeschwindigkeit $w_{FL\downarrow}$ ermittelt. Für die Auslegung von technischen Wirbelschichten wird damit ein Wert ermittelt, der auf der sicheren Seite liegt. Für die im Bezug auf die Reinigungsanlage im Mähdrescher interessierende Fragestellung muß jedoch die untere Fluidisierungsgeschwindigkeit $w_{FL\uparrow}$ gemessen werden, da von ihrer Kenntnis ein Zusammenhang mit der Reinigungsleistung erwartet

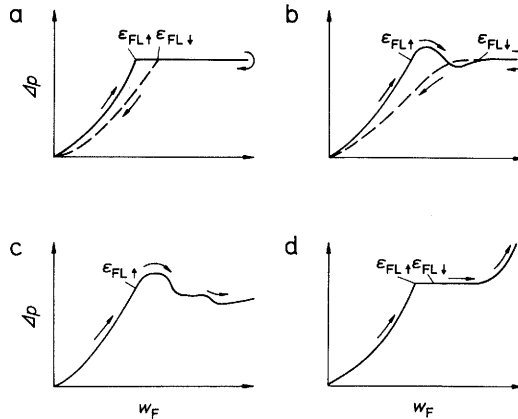


Bild 26: Verhalten von Schüttungen. a= ideale Fluidisierung, b= schwache Kanalbildung, c= starke Kanalbildung, d= stoßende Teilschichten, $\uparrow$ = unterer, $\downarrow$ = oberer Fluidisierungspunkt, nach [64].

wird. Anders als bei Werther [68] wird unter dem Begriff Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} hier immer die untere Fluidisierungsgeschwindigkeit $w_{FL\uparrow}$ verstanden. Zur Messung wird beim verwendeten Versuchsablauf (vgl. Kapitel 5.2) die Luftgeschwindigkeit zunächst von null an in den Bereich der fluidisierten Schüttung gesteigert und anschließend wieder auf null verringert, Bild 26a. Mit diesem Versuchsablauf können beide Fluidisierungsgeschwindigkeiten ermittelt werden.

4.3.2 Korn/Spreu-Trennung auf der Reinigungsanlage

Der vom Dreschkorb und von der Korn/Stroh-Trenneinrichtung aus dem gesamten Massenstrom abgeschiedene Teilstrom gelangt zur Korn-Spreu-Trennung, Bild 12. Er enthält mit Ausnahme des Verlustkornmassenstromes der Korn/Stroh-Trennung den gesamten Kornmassenstrom und einen von der Konstruktion und Einstellung des Dreschwerkes und der Korn/Stroh-Trennung abhängigen Anteil an Nicht-Korn-Be Bestandteilen (Spreu).

Die Aufgabe der Korn/Spreu-Trennung (Reinigungsanlage) besteht in der möglichst verlustfreien Trennung des Korn/NKB-Gemisches. Für den Sortiervorgang werden Trennelemente eingesetzt, die einen statistischen Größenvergleich an einer Trennfläche durchführen. Um die Körner an die Trennfläche heranzuführen (Entmischung) muß eine Relativbewegung zwischen Siebgut und Trennfläche erzeugt werden, Wessel [71]. Obwohl Verfahren, die mit künstlich erzeugten Beschleunigungsfeldern arbeiten [72,73], wegen ihrer Neigungsunempfindlichkeit, grundsätzlich besser für den mobilen Betrieb geeignet sind, werden im Mähdrescher für die Korn/Spreu-Trennung ausschließlich ebene Schwingsiebe eingesetzt (Flachsieb-Reinigungsanlage). Die Trennfläche ist Teil eines Gelenkvierecks, Bild 27 und wird durch die Wahl der Antriebsparameter und Längenverhältnisse so in Schwingungen versetzt, daß nicht nur eine vertikale, sondern auch eine horizontale Beschleunigungskomponente auftritt, die eine Förderung des Siebgutes bewirkt. Die Bewegungstheorie im Hinblick auf die Reinigungsanlage im Mähdrescher kann den grundlegenden Arbeiten von Rochell [53], Freye [61] und Damm [74] entnommen werden.

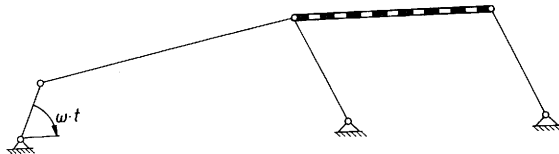


Bild 27: Getriebeschema der Flachsieb-Reinigungsanlage im Mähdrescher (ebenes Schwingsieb).

Für die Arbeitsqualität der Reinigungsanlage im Mähdrescher ist die Entmischung des Korn/Spreu-Haufwerkes von entscheidender Bedeutung. Wegen der völlig anderen Zusammensetzung des zu trennenden Gemisches, kann die Entmischung, anders als bei der Korn/Stroh-Trennung, nicht alleine durch die vom Schwingsieb erzeugten Relativbewegungen erreicht werden. Da die Partikellängen

der Spreufraktion sehr viel kleiner als die der Strohfraktion sind, entsteht ein Reinigungsgemisch mit vergleichsweise geringem Hohlraumvolumen. Dadurch sind die Bewegungsmöglichkeiten der einzelnen Haufwerksteilchen stark eingeschränkt. Eine Korn/Spreu-Trennung mit geringem Kornverlust wird erst möglich, wenn das Haufwerk zusätzlich aufgelockert wird. Zu diesem Zweck wird die Schüttung auf der Trennfläche mit Luft durchströmt. Die Luftgeschwindigkeit muß dabei so gewählt werden, daß die Schüttung in einen Zustand überführt wird, in dem die Bewegungsmöglichkeiten der Haufwerksteilchen soweit erhöht sind, daß eine Entmischung und Abscheidung durch die Siebschwingung ermöglicht wird.

Da in der NKB-Fraktion (Spreu) zahlreiche Teilchen enthalten sind, die in der Größenordnung der an der Trennfläche abzuscheidenden Körner liegen, deren Schwebegeschwindigkeit aber sehr niedrig ist, wird durch die Luftströmung gleichzeitig eine Windsichtung erreicht, die die Reinheit der Kornfraktion erheblich verbessert.

Durch geeignete Abstimmung der mechanischen (Schwingungsfrequenz f_e , Schwingungsamplitude A_e) und pneumatischen Parameter (Betrag und Richtung der Luftströmung) kann die Funktion der Reinigungsanlage im Mähdrescher optimiert werden, Freye [61].

4.3.2.1 Konstruktive Gestaltung der Reinigungsanlage

Bild 28 zeigt den Aufbau einer typischen Flachsieb-Reinigungsanlage, wie sie im Mähdrescher eingebaut wird.

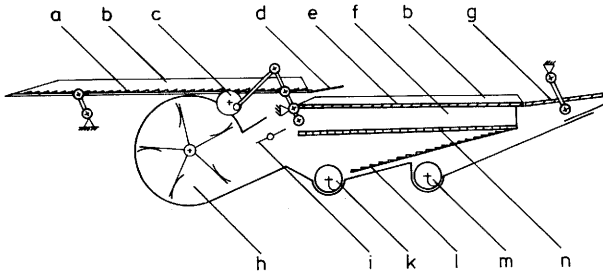


Bild 28: Aufbau der Flachsieb-Reinigungsanlage im Mähdrescher nach Freye [61].

a	Vorbereitungsboden	e	Obersieb	i	Luftleitblech
b	Hangleiste	f	Siebkasten	k	Körnerschnecke
c	Kurbeltrieb	g	Überkehriesieb	l	Rücklaufboden
d	Fallstufe	h	Gebläse	m	Überkehrrschnecke
				n	Untersieb

Das Reinigungsgemisch gelangt nach der Abscheidung am Dreschkorb und bei der Korn/Stroh-Trennung auf den Vorbereitungsboden (a), der ebenso wie die Siebe, mit mehreren in Förderrichtung verlaufenden Hangleisten (b) versehen ist, die eine seitliche Verschiebung der Gutschicht bei Hangneigungen verhindern sollen. Die Schwingbewegung des Vorbereitungsbodens wird von einem Kurbeltrieb (c) erzeugt, der auch die Siebbewegung bewirkt. Über eine luftdurchströmte Fallstufe (d), die eine erste Windsichtung durchführt, gelangt das Gutgemisch auf die luftdurchströmten Schwing-siebe (e,n). Die abgeschiedenen Körner kommen über einen Rücklaufboden (l) zur Körnerschnecke (k) und von dort zum Korntank. Mit Hilfe einer Obersiebverlängerung (g) mit größerer Maschenweite als beim Obersieb werden am Siebende unausgedroschene Ähren aus den Nicht-Korn-Bestandteilen abgeschieden, die von der Überkehrrschnecke (m) erneut einem Dreschvorgang zugeführt werden.

Ausgehend von dieser Grundbauform gibt es zahlreiche Ausführungen, die sich durch die Siebanordnung, die Anzahl der Fallstufen und die Gebläsebauart unterscheiden. Konstruktive Einzelheiten können der Literatur entnommen werden, [3,55,61,75,76,77].

Besondere Anforderungen werden an den Verlauf der Kennlinie des Gebläses in der Reinigungsanlage gestellt. In Bild 29 ist beispielhaft die Kennlinie eines Radialgebläses einer Reinigungsanlage dargestellt. Es sei auf den im Arbeitsbereich linearen Verlauf und auf den bei zunehmendem Gegendruck stark abnehmenden Volumenstrom hingewiesen.

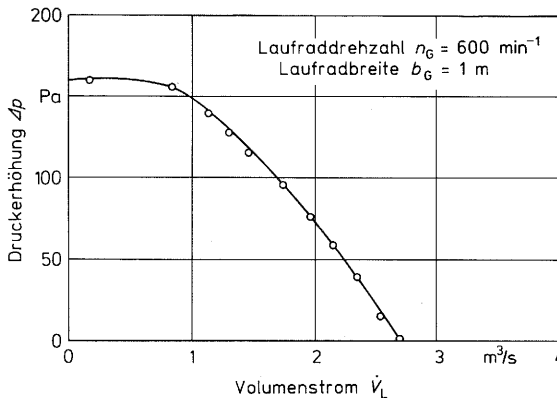


Bild 29: Gebläsekennlinie des Radialgebläses einer Flachsieb-Reinigungsanlage im Mähdrescher.

Wesentliche Bedeutung für die vorliegende Untersuchung hat das, von Freye [61] beschriebene typische Verlustverhalten der Reinigungsanlage. Nach Bild 30 kann die Durchsatz/Verlust-Kennlinie in drei typische Betriebszustände eingeteilt werden, die auf jeweils unterschiedlichen Durchströmungszuständen der Schüttung auf dem Obersieb der Reinigungsanlage beruhen. Die Flugphase tritt ein, wenn die Schichthöhe auf dem Obersieb der Reinigungsanlage infolge kleiner Masssendurchsätze niedrig ist. Der Druckabfall beim Durchströmen der Schüttung ist entsprechend klein und der Betriebspunkt des Gebläses der Reinigungsanlage bewegt sich entlang seiner Kennlinie zu großen Volumenströmen. Die Anströmgeschwindigkeit

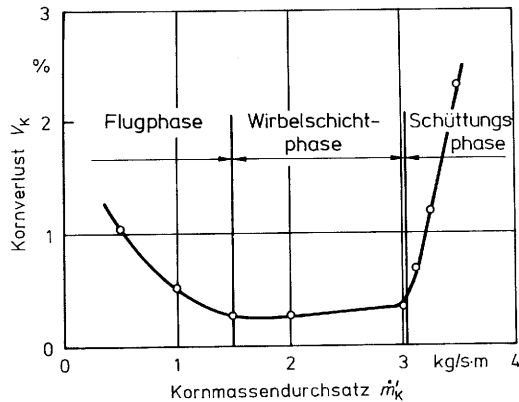


Bild 30: Zusammenhang zwischen Massendurchsatz und Kornverlust bei der Reinigungsanlage im Mähdrescher, nach Freye [61].

zum Obersieb kann dabei so groß werden, daß die auf die Partikel einwirkenden Strömungskräfte eine Abscheidung der Körner am Sieb verhindern oder einzelne Körner bereits in den Zustand der pneumatischen Förderung übergehen und über das Ende der Reinigungsanlage ausgetragen werden. Der Kornverlust steigt dann entsprechend an. Mit zunehmendem Massendurchsatz steigt die Siebbeladung an und das Gebläse wird gedrosselt. Auf dem Obersieb der Reinigungsanlage bildet sich dabei eine Wirbelschicht. Die Schüttung ist in diesem Zustand fluidisiert d.h. es liegen optimale Entmischungsverhältnisse vor. Steigt der Massendurchsatz weiter an, wird das Gebläse so stark gedrosselt, daß die Anströmgeschwindigkeit nicht mehr ausreicht, um in der Schüttung den fluidisierten Zustand aufrecht zu erhalten. Die Durchströmungsverhältnisse entsprechen dann denen einer ruhenden Schüttung. In der Schüttungsphase ist die Entmischung der Schüttung erheblich erschwert, so daß Körner über das Siebende transportiert werden und der Kornverlust stark ansteigt.

4.3.2.2 Zusammenhang zwischen Fluidisierungsgeschwindigkeit und Reinigungsleistung

Zur Erläuterung der Zusammenhänge zwischen der Durchsatzleistung der Reinigungsanlage und den Stoffeigenschaften des Reinigungsgemisches werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen.

- Die Reinigungsanlage besteht nur aus dem Obersieb
- Die Anströmverhältnisse zum Obersieb sind so, daß die Luftgeschwindigkeitsverteilung über der gesamten Obersiebfläche konstant ist.
- Der Trennvorgang wird gegenüber dem Entmischungsvorgang vernachlässigt d.h. die Siebbeladung ist auf der gesamten Siebfläche konstant (keine Abscheidung von Körnern)

Infolge der tatsächlichen Verhältnisse auf dem Obersieb der Reinigungsanlage entfernen sich die zweite und die dritte Annahme zusammen nicht zu weit vom wirklichen Prozeß, obwohl jede für sich genommen eine grobe Vereinfachung darstellt.

Da der Trennvorgang auf dem Obersieb der Reinigungsanlage dem in Kapitel 4.2.1 beschriebenen entspricht, der Verlauf der Kornrestfunktion also durch Bild 17 wiedergegeben wird, nimmt die Massenbelegung auf dem Sieb zum Siebende hin stark ab. Die Gebläseanordnung in ausgeführten Reinigungsanlagen führt jedoch dazu, daß die Luftverteilung über der Länge des Obersiebes bei unbeladenem Sieb dem Verlauf der Kornrestfunktion über der Sieblänge entspricht, Bild 31. Die Luftgeschwindigkeit ist dadurch in jedem Siebflächenelement dA_{Sieb} konstant, da an Stellen großer Schichthöhe auch ein größerer (Teil-)Volumenstrom gelangt und umgekehrt. Diese Annahme wird von Freye [61] bestätigt, Bild 31. Damit kann im folgenden mit den getroffenen Annahmen gearbeitet werden.

Die Sieblänge l_{Sieb} und die Siebbreite b_{Sieb} sind vorgegeben und ergeben die Siebfläche A_{Sieb} . Die Fördergeschwindigkeit w_s der Schüttung über das Obersieb hängt nach Freye [61] von den mechanischen Parametern des Reinigungsanlagenantriebes und von den pneu-

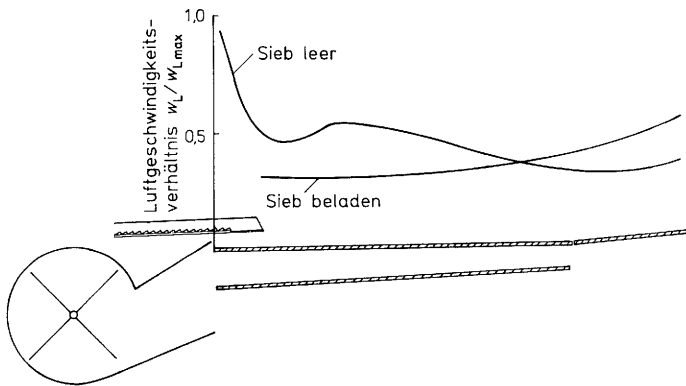


Bild 31: Luftgeschwindigkeitsverteilung über der Sieblänge bei unbeladenem und bei beladenem Sieb. Luftgeschwindigkeits-Messung 120mm über dem Obersieb, nach Freye [61].

matischen Kräften infolge der Horizontalkomponente der Luftgeschwindigkeit ab. Der sich einstellende Luftvolumenstrom V_L hängt über die Gebläsekennlinie vom Druckabfall in der Schüttung auf dem Obersieb ab. Der Strömungswiderstand des Siebes selbst muß gegebenenfalls mitberücksichtigt werden, da er in der selben Größenordnung liegt, Böttinger [78]. Die Siebbeladung ist definiert als Quotient aus der gesamten zu einem Zeitpunkt t auf dem Sieb befindlichen Masse und der Siebfläche. Die Gutmasse, die sich zu einem Zeitpunkt t auf dem Sieb befindet, kann aus Gl.(27) berechnet werden.

$$m = \dot{m} \cdot t_{sieb} = \dot{m} \cdot \frac{l_{sieb}}{w_s} \quad (27)$$

Für den Druckabfall in einer fluidisierten Schüttung gilt Gleichung (21). Aus Gl.(27) und Gl.(28) folgt unter Vernachlässigung des Auftriebes Gl.(29) für den durch das Reinigungsgut verursachten Druckabfall.

$$\Delta p \cdot A_{Sieb} = m \cdot g = A_{Sieb} \cdot h_{Sch} \cdot (1-e) \cdot \rho_s \cdot g \quad (28)$$

$$\Delta p = \frac{\dot{m}}{b_{Sieb}} \cdot \frac{g}{w_s} \quad (29)$$

Der Druckabfall ist also eine Funktion des breitenbezogenen Massendurchsatzes und der Fördergeschwindigkeit. Setzt man die fluidisierte Schüttung als anzustrebenden Betriebszustand voraus, dann bestimmt der Fluidisierungsdruckabfall Δp_{FL} den Betriebspunkt des Gebläses und damit die sich einstellende Luftgeschwindigkeit w_L .

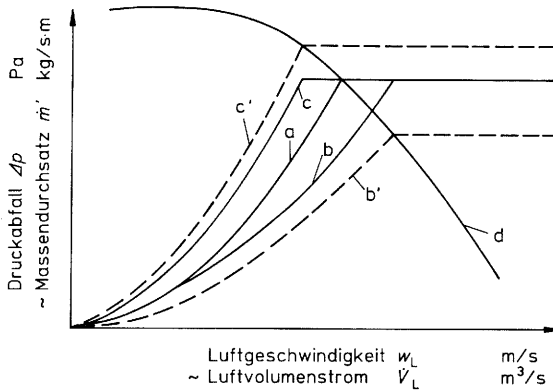


Bild 32: Betriebspunkte der Reinigungsanlage im Mährescher als Schnittpunkte der Gebläsekennlinie (d) und der Fluidisierungskurven des Reinigungsgutes (a bis c).

a = mittlere, b = hohe und c = niedrige Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} bei gleichem Massendurchsatz. b' = geringerer Massendurchsatz bei hoher Fluidisierungsgeschwindigkeit. c' = höherer Massendurchsatz bei niedriger Fluidisierungsgeschwindigkeit.

Auf die reale Reinigungsanlage übertragen bedeutet dies, daß die Vertikalkomponente der sich einstellenden Luftgeschwindigkeit größer als die Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} der Schüttung sein muß. Der Betriebszustand der Reinigungsanlage ist also eine Funktion des Massendurchsatzes und der Stoffeigenschaft w_{FL} des Reinigungsgutes

$$V_K = f (\dot{m}, w_{FL}) \quad (30)$$

Daraus ergibt sich der in Bild 32 dargestellte grundsätzliche Zusammenhang zwischen der Durchsatzleistung der Reinigungsanlage und der Fluidisierungsgeschwindigkeit des Reinigungsgemisches. Der Betriebspunkt der Reinigungsanlage liegt im Schnittpunkt der Gebläsekennlinie (d) mit der jeweiligen Fluidisierungskurve (a bis c). Entspricht die Abszissenkoordinate des Schnittpunktes der Fluidisierungsgeschwindigkeit des Reinigungsgemisches, ist der Übergang von der Wirbelschichtphase in die Schüttungsphase und damit die Leistungsgrenze der Reinigungsanlage erreicht (Fall a). Ist die Luftgeschwindigkeit im Schnittpunkt kleiner als die Fluidisierungsgeschwindigkeit (Fall b), ist eine ausreichende Auflockerung des Reinigungsgutes nicht mehr gewährleistet, und die Leistungsgrenze verschiebt sich zu kleineren Massendurchsätzen (Fall b'). Liegt der Schnittpunkt rechts von der Fluidisierungsgeschwindigkeit (Fall c), ist ein entsprechend größerer Massendurchsatz möglich (c'). Die Proportionalität von Druckabfall in der Schüttung und Massendurchsatz gilt dabei nur bei fluidisierter Schüttung.

5 Meßverfahren für technologische Stoffeigenschaften

5.1 Entmischungsversuch

5.1.1 Aufbau des Durchdringungszeit-Prüfstandes

Für die experimentellen Untersuchungen wurde nach dem Funktionsprinzip von Bild 19 ein Prüfstand zur Messung der technologischen Stoffeigenschaft Durchdringungszeit $t_{0,8}$ entwickelt. Der konstruktive Aufbau dieses Durchdringungszeit-Prüfstandes ist in Bild 33 dargestellt.

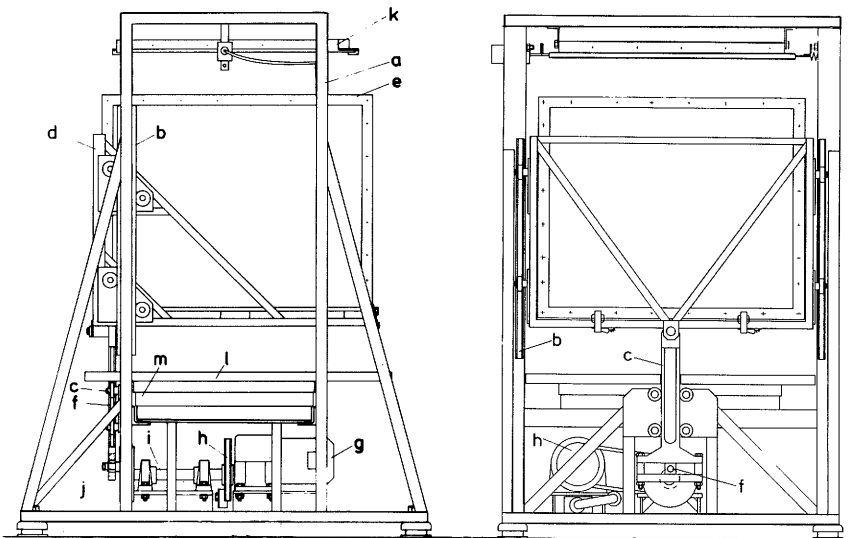


Bild 33: Aufbau des Durchdringungszeit-Prüfstandes. Vorderansicht
vgl. Bild 34.

- | | | | |
|---|---------------------|---|-------------------------------------|
| a | Maschinenrahmen | f | Kreuzschubkurbelgetriebe |
| b | Führungsschienen | g | Elektromotor mit Zusatzschwingmasse |
| c | Schubstange | h | Keilriementrieb |
| d | Führungsschlitten | i | Hauptantriebswelle |
| e | Versuchsgutbehälter | j | Kreuzschubkurbelgetriebe |
| | | k | Kornaufgabevorrichtung |

Der Maschinenrahmen (a) nimmt die während der oszillierenden Bewegung auftretenden Kräfte auf. Hauptfunktionsteile sind die Hauptstützen mit den Führungsschienen (b) für die beweglichen Maschinenteile und die Längsführung der Schubstange (c) des Antriebs. Der Führungsschlitten (d) ist über Laufrollen in den Schienen des Maschinenrahmens gelagert. Er überträgt die Antriebsbewegung auf den Versuchsgutbehälter (e) und enthält alle für dessen Befestigung notwendigen Bauteile. Die oszillierende Bewegung wird über einen Bolzen von der Schubstange des Kreuzschubkurbelgetriebes (f) übertragen. Der Antrieb erfolgt über einen Drehstromasynchronmotor (g) mit Zusatzschwingmasse und angebaute Stirnradgetriebe. Die Antriebsleistung wird von einem Keilriementrieb (h) auf eine separate Hauptantriebswelle (i) übertragen. Ein Kreuzschubkurbelgetriebe (j) wandelt die Drehbewegung in eine rein sinusförmig-oszillierende Bewegung um. Der Versuchsgutbehälter (e) dient zur Aufnahme der Strohschüttung. Die untere Öffnung des Behälters ist als Sieb ausgebildet. Die Körner werden von einer Kornaufgabevorrichtung (k) über dem Versuchsgutbehälter gleichzeitig auf die vertikal schwingende Strohschicht aufgegeben. Nach dem Durchtritt durch die Strohschicht treten die Körner durch den Siebboden des Versuchsgutbehälters aus und fallen auf eine Waagschale (l), die auf einer kontinuierlich arbeitenden elektronischen Waage (m) steht.

Für die Einhaltung konstanter Versuchsbedingungen ist es erforderlich, bei der Herstellung der Strohschüttung im Versuchsgutbehälter eine gute Wiederholgenauigkeit zu erzielen. Für den Entmischungversuch werden deshalb nur nicht geknickte Strohhalme von 700 mm Länge verwendet. Dadurch bleibt der Einfluß der Vorbehandlung der Strohhalme durch das Dreschwerk unberücksichtigt. Der Reproduzierbarkeit der Versuchsbedingungen wurde jedoch Vorrang vor einer exakten Nachbildung des Schüttlers eingeräumt. Damit erhalten die Abmessungen des Versuchsgutbehälters eine wesentliche Bedeutung. Für den ausgeführten Prüfstand wurde eine quadratische Grundfläche von 0,5 m² gewählt. Der Siebboden wird von einem quadratischen Drahtmaschengewebe mit 10 mm Kantenlänge der Öffnungen und 1 mm Drahtdurchmesser gebildet. Dadurch entsteht ein Sieb mit sehr großer Öffnungsfläche, das die Kornabscheidung nur unwesentlich behindert, den Strohdurchgang aber wirksam verhindert.

Die als Spaltboden ausgeführte Kornaufgabevorrichtung ist so über dem Versuchsgutbehälter angebracht, daß die Symmetrielinien mit denen des Behälters zusammenfallen und allseitig ein Randabstand von 50 mm zur Versuchsgutbehälterwand eingehalten wird. Die Bodenspalte werden in Verschußstellung der Kornaufgabe von einem Spaltschieber überdeckt. Zur Öffnung muß der Schieber lediglich um eine Spaltteilung verschoben werden. Der kurze Öffnungsweg erlaubt kleine Öffnungszeiten ($\Delta t \leq 0,5 \text{ s}$), so daß eine gleichzeitige Aufgabe der Körner gewährleistet wird. Der Spaltschieber wird über einen Elektromagneten betätigt und über Rückzugsfedern wieder geschlossen. Bild 34 zeigt den ausgeführten und betriebsbereiten Durchdringungszeit-Prüfstand.

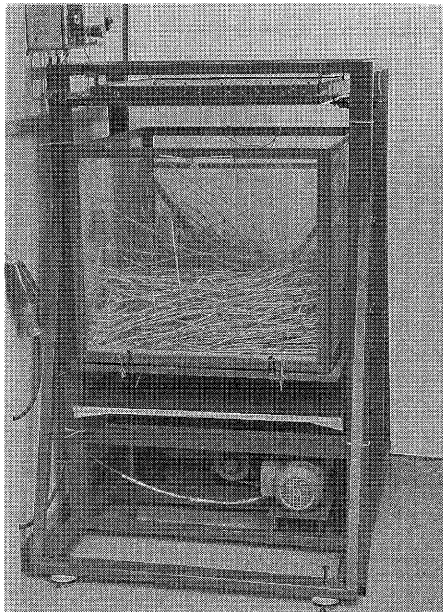


Bild 34: Durchdringungszeit-Prüfstand.

Die Körner werden nach dem Durchdringen der Strohschicht auf einer Waagschale aufgefangen, deren Fläche derjenigen des Versuchsgutbehälters entspricht. Damit wird erreicht, daß der Weg bzw. die Fallzeit vom Sieb bis zur Wägung für alle Körner exakt gleich ist. Die Wägung erfolgt durch eine elektronische Wägeplattform (Firma K-tron). Das Funktionsprinzip dieser Waage erlaubt es die Massen-

zunahme während des Versuches zu erfassen. Der Gewichtswert wird aus der Schwingungsfrequenz einer Saite bestimmt, deren Vorspannung sich bei Belastung der Waage ändert. Der Vergleich mit der Frequenz einer unter konstanter Vorspannung stehenden Saite, erlaubt eine Impuls- und Schwingungskompensation des Wägewertes. Wegen der großen oszillierenden Massen und der damit verbundenen Schwingungsbeanspruchung des Maschinenrahmens, ist die Waage auf einem vom Maschinenrahmen vollständig getrennten Gestell angebracht. Die vollständige Entkopplung von den Prüfstandsschwingungen ermöglicht eine sehr gute Wägegenauigkeit.

5.1.2 Prüfstandsteuerung und Meßwerterfassung

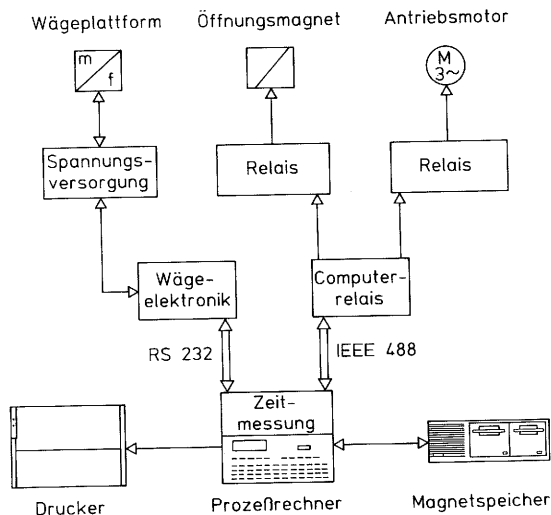


Bild 35: Aufbau der Meß- und Steuerungstechnik des Durchdringungszeit-Prüfstandes.

Die Steuerung des Versuchesablaufes und die Meßwerterfassung werden am Durchdringungszeit-Prüfstand von einem Prozeßrechner übernommen. Die Verwendung eines vollautomatischen Versuchesablaufes dient zum einem der Normierung der Versuchesbedingungen und erlaubt zum anderen eine große Anzahl von Wiederholungsversuchen in kurzer Zeit. Bild 35 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Meß- und

Steuerungstechnik des Durchdringungszeit-Prüfstandes. Über einen parallelen Datenbus steuert der Rechner zwei Computerrelais, die ihrerseits die Leistungsrelais für den Motor des Prüfstandes und für den Öffnungsmagneten der Kornaufgabevorrichtung schalten. Damit wird gewährleistet, daß der Kornaufgabezeitpunkt exakt mit dem Beginn der Zeitmessung zusammenfällt und daß die Kornaufgabe bei der jeweils gleichen Versuchsgutbehälterstellung erfolgt. Die Einhaltung konstanter Bedingungen am Versuchsbeginn ist für eine gute Wiederholgenauigkeit von entscheidender Bedeutung.

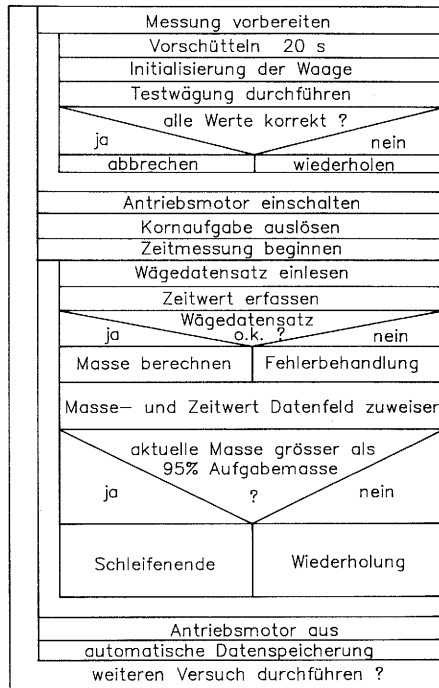


Bild 36: Vereinfachter Programmablaufplan (Struktogramm) des Steuerprogrammes für den Prozeßrechner des Durchdringungszeit-Prüfstandes.

Über eine serielle Schnittstelle steuert der Prozeßrechner gleichzeitig die elektronische Waage und empfängt die Massenumwandlungswerte von der Wägeelektronik. Die Zeitmessung erfolgt im Prozeßrechner selbst über eine eingebaute Echtzeituhr. Der zeitliche Ablauf des Entmischungsversuches ist in Form eines vereinfachten Programmablaufplanes in Bild 36 dargestellt.

Vor dem eigentlichen Versuchsbeginn wird die Strohschicht im Versuchsgutbehälter durch Einschalten des Antriebes für eine definierte Zeit in Schwingungen versetzt. Dieses Vorschütteln dient der Normierung der Anfangsbedingungen des Versuches, da Unregelmäßigkeiten, die auf Grund der Behälterbefüllung von Hand entstehen, auf diese Weise weitgehend ausgeglichen werden können. Der Entmischungsversuch wird automatisch beendet, wenn der Wägewert 95% der aufgegebenen Kornmasse erreicht. Danach werden die Messwerte für die Weiterverarbeitung auf einem magnetischen Datenträger gespeichert. Zur schnellen Beurteilung des Versuchserfolges, können die Meßwerte außerdem auf dem Bildschirm des Prozeßrechners graphisch dargestellt werden.

5.1.3 Meßwertverarbeitung

Zur Bestimmung der Durchdringungszeit $t_{0,8}$ muß der Schnittpunkt der $\eta = 0,8$ -Linie mit der Korndurchgangsfunktion bestimmt werden. Da während des Entmischungsversuches am Durchdringungszeit-Prüfstand nur diskrete Punkte der Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ ermittelt werden, muß die stetige Korndurchgangsfunktion in einem zweiten Schritt aus den Meßwertpaaren berechnet werden.

Zur Berechnung der Parameter der stetigen Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ sind wegen der Nichtlinearität der Funktionsgleichung rechenintensive Algorithmen erforderlich. Die Meßwerte werden deshalb zur Auswertung vom Prozeßrechner an einen leistungsfähigen Arbeitsplatzrechner übertragen.

Das Auswerteprogramm verwendet eine Regressionsroutine nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Die Parameter einer vorgegebenen Funktion werden dabei so angepaßt, daß die Summe der quadratischen Abweichungen der wirklichen Meßwerte von den Funktionswerten der errechneten Funktionsgleichung an derselben Stelle minimal

wird. Dazu müssen sowohl die Funktionsgleichung selbst als auch ihre partiellen Ableitungen nach den Parametern bekannt sein. Um eine vollständige Beschreibung der Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ zu erhalten, muß bei der Regressionsrechnung entweder die Gleichung (12) oder die Gleichung (17) als Modellfunktion verwendet werden. In beiden Fällen handelt es sich um eine komplizierte Exponentialfunktion, deren partiellen Ableitungen zu umfangreichen Funktionstermen führen. Dadurch wird der Rechenaufwand bei der Parameteranpassung sehr hoch. Wesentlich problematischer ist jedoch, daß der Algorithmus bei diesen Kurvengleichungen sehr empfindlich auf die Wahl der Parameterstartwerte reagiert, so daß es unter Umständen zu Konvergenzproblemen kommt.

Da es für die Bestimmung der Durchdringungszeit $t_{0,8}$ lediglich erforderlich ist die Funktionsgleichung im Bereich des Schnittpunktes mit hinreichender Genauigkeit zu kennen, kann für die praktische Berechnung eine wesentlich einfachere Funktionsgleichung für die Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ angesetzt werden. Für die Auswertung wurde deshalb eine einfache Exponentialfunktion nach Gl.(31) angesetzt.

$$\eta(t) = 1 - e^{(a \cdot t + b)} \quad (31)$$

In genügender Entfernung vom Wendepunkt wird die Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ von dieser Gleichung gut beschrieben. Die Konvergenz des Regressionsalgorithmus ist dabei auch bei ungenau gewählten Startwerten sehr gut und die Rechenzeit ist in Folge der einfachen Gleichung kurz.

Bild 37 zeigt an einem Beispiel, daß sich der Kurvenverlauf im interessierenden Bereich bei der Verwendung der vereinfachten Funktionsgleichung nicht wesentlich von dem der theoretischen Gleichung unterscheidet. Der Schnittpunkt mit der $\eta=0,8$ - Horizontalen und damit die Durchdringungszeit $t_{0,8}$ wird mit Hilfe eines numerischen Verfahrens aus der ermittelten Kurvengleichung berechnet.

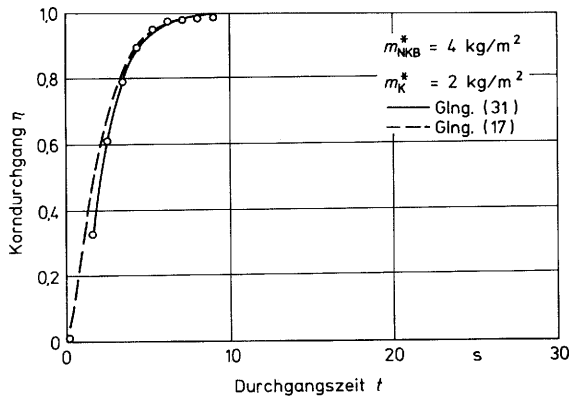


Bild 37: Stetige Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ nach Gleichung (17) und Gleichung (31).

5.1.4 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen am Durchdringungszeit-Prüfstand dienen vor allem der Festlegung der Parameter eines Normentmischungsversuches, mit dem die technologische Stoffeigenschaft Durchdringungszeit $t_{0,8}$ ermittelt werden kann. Die wesentlichen festzulegenden Parameter sind:

- Herstellung der Strohschüttung
- Wahl der Antriebsparameter
- Strohmassenbelegung
- Kornmassenbelegung

Darüber hinaus wurden zum Nachweis der Eignung des Entmischungsversuches als Meßverfahren die Wiederholgenauigkeit sowie der typische Meßfehler des Verfahrens untersucht.

Bei der Herstellung der Strohschüttung im Versuchsgutbehälter des Durchdringungszeit-Prüfstandes ist die Reproduzierbarkeit von entscheidender Bedeutung. Um eine möglichst große Versuchsanzahl in kurzer Zeit zu ermöglichen, muß außerdem der Aufwand für die Herstellung der Strohschüttung begrenzt werden. Baader et al. [54]

verwendeten bei ihren Entmischungsversuchen Strohschüttungen aus abgelagerten Haferstrohhalm, die auf eine mittlere Halmlänge von 300 mm geschnitten wurden. Anschließend wurden die Halme in einer Drescheinrichtung geknickt und in den Versuchsgutbehälter eingefüllt. Die so entstandene Schüttung entspricht etwa den Verhältnissen auf einem Hordenschüttler. Wegen des großen Aufwandes für die Vorbereitung der Strohhalme und wegen der schwer zu gewährleistenden Reproduzierbarkeit, wurde für die vorliegenden Untersuchungen ein anderes Verfahren zur Herstellung der Strohschüttung verwendet.

Für die Messung der Stoffeigenschaft Durchdringungszeit $t_{0,8}$ ist die Knickung der Halme nicht von entscheidender Bedeutung. Die Oberflächeneigenschaften von Körnern und Stroh wirken sich auch bei einem anderen Aufbau des Strohhaufwerkes auf den Verlauf der Korndurchgangsfunktion aus, da dessen Bewegungsverhalten sich nicht wesentlich verändert. Wegen der besseren Reproduzierbarkeit wird die Strohschüttung im Versuchsgutbehälter deshalb aus ungeknickten Halmen von 700 mm Länge (= Behälterseitenlänge) aufgebaut. Bei dem für die hier beschriebenen Entmischungsversuche ausschließlich verwendeten Weizenstroh ist es damit möglich, die Halme während der Versuche aus dem stehenden Bestand zu schneiden oder sie während der Laborversuche durch Entfernung der Ähren aus eingelagerten Garben zu gewinnen. Für die Herstellung der Schüttung im Versuchsgutbehälter werden die Halme parallel geschichtet, Bild 38. Eine kreuzweise Schichtung, die zur Verminderung des Randeinflusses ebenfalls untersucht wurde, hat sich nicht bewährt, da die entstehende Schüttung bereits bei kleinen Schütthöhen instabil wird und deshalb während des Entmischungsversuches zum Kippen neigt.

Die Vorschüttelzeit von 20 Sekunden führt bei der Parallelschichtung zu einem Ausgleich der Einfülleneinflüsse, da sich die Halme ungehindert gegeneinander bewegen können. Bei Versuchsbeginn liegt auf diese Weise eine homogene Strohschüttung vor.

Die Antriebsparameter, Erregeramplitude A_e und Erregerfrequenz f_e , wurden so gewählt, daß optimale Entmischungsverhältnisse vorliegen, das heißt, daß die gemessene Durchdringungszeit $t_{0,8}$ ein Minimum erreicht. Dies ist dann der Fall, wenn die Bewegung der

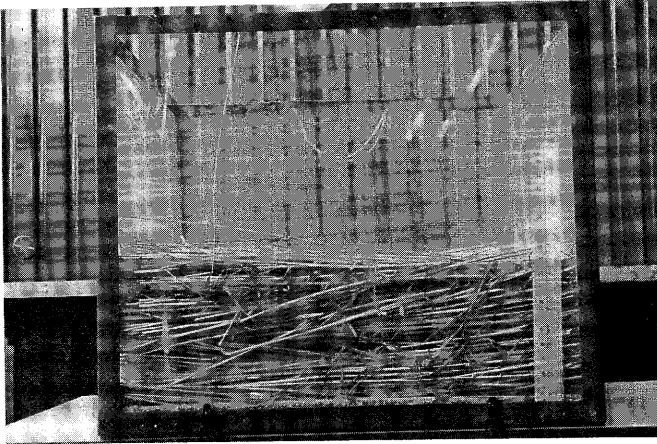


Bild 38: Strohschüttung aus parallelen Halmen von 700 mm Länge im Versuchsgutbehälter des Durchdringungszeit-Prüfstandes vor dem Vorschütteln. Strohmassenbelegung $m_{\text{NKB}}^* = 4 \text{ kg/m}^2$.

obersten Strohschicht vom Einfach- in den Wechselwurf übergeht. In diesem Zustand schwingt die oberste Strohschicht mit halber Erregerfrequenz, während die unteren Schichten nach wie vor einen vollen Einfachwurf mit Erregerfrequenz ausführen, Bild 39.

Die Ergebnisse von Baader et al. [54] wurden damit auch auf dem hier beschriebenen Durchdringungszeit-Prüfstand bestätigt. In Übereinstimmung mit diesen Ergebnissen (vgl. Bild 21) wurden die Erregerfrequenz f_e zu 4 Hz und die Erregeramplitude A_e zu 30 mm gewählt, so daß die Wurfkennziffer $\Gamma = 2$ erreicht wird. Eine Veränderung dieser Antriebsparameter erbrachte erwartungsgemäß keine Verbesserung des Entmischungserfolges.

Um eine für den Normversuch optimale Strohmassenbelegung m_{NKB}^* festlegen zu können, wurden verschiedene Massenbelegungen untersucht. Bild 40 zeigt, daß die Durchgangszeit $t_{0,8}$ mit steigender Strohmassenbelegung m_{NKB}^* progressiv zunimmt. Der Zusammenhang zwischen der Strohmassenbelegung und der Durchdringungszeit läßt sich durch eine Potenzfunktion ausdrücken (vgl. Bild 22). Bei diesen Versuchen wurde auch der Zusammenhang zwischen der Strohmassenbelegung m_{NKB}^* und der Schütthöhe h_{Sch} im Versuchsgutbehälter untersucht, Bild 41.

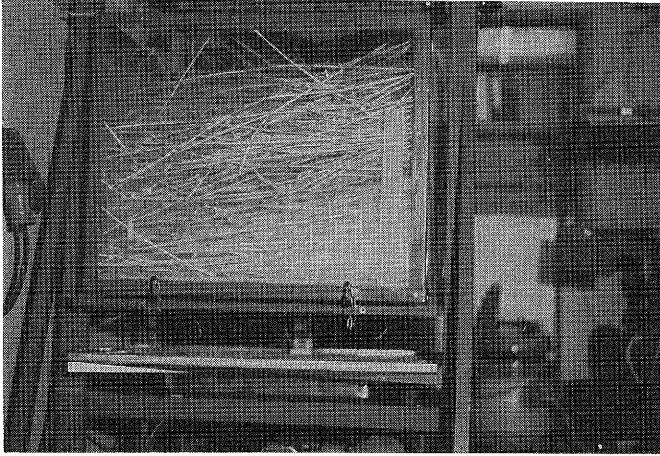


Bild 39: Strohschüttung während des Entmischungsversuches, obere Strohschicht im Bereich des Wechselwurfes. Strohmassenbelegung $m_{\text{NKB}}^* = 4 \text{ kg/m}^2$.

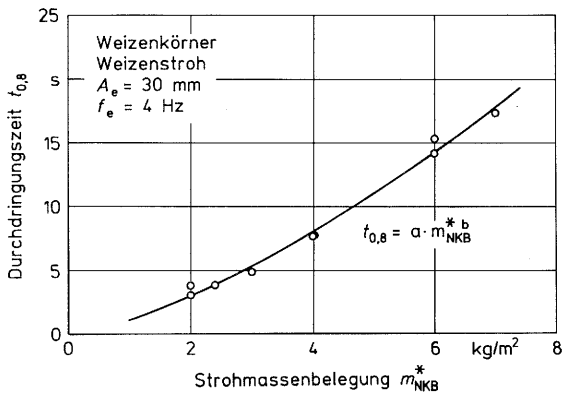


Bild 40: Durchdringungszeit $t_{0,8}$ bei verschiedenen Strohmassenbelegungen.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Glaser [58] zeigte sich, daß die statische Strohdichte im interessierenden Bereich nur unwesentlich von der Strohmassenbelegung abhängt. Bei den im

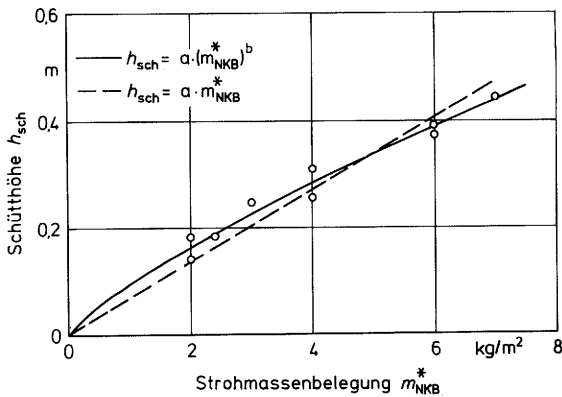


Bild 41: Schütthöhe h_{sch} als Funktion der Strohmassenbelegung m_{NKB}^* für zwei Funktionstypen. a und b Regressionsparameter.

praktischen Betrieb vorkommenden Massenbelegungen bis etwa 8 kg/m^2 kann die Schüttdichte des Strohhaufwerkes mit guter Genauigkeit als konstant angesehen werden (Gerade in Bild 41).

Für den Normentmischungsversuch wurde eine Strohmassenbelegung von $m_{NKB}^* = 4 \text{ kg/m}^2$ gewählt. Bei der ausgeführten Versuchsgutbehälterhöhe kann mit dieser Massenbelegung gewährleistet werden, daß die Strohschicht bei der Schichthöhenvergrößerung infolge der Schwingungsanregung den oberen Behälterrand nicht erreicht, Bild 39. Bei kleineren Massenbelegungen als der gewählten, ist die Standardabweichung (Streuung der Messwerte) in der Regel etwas geringer. Diese Massenbelegungen entsprechen aber nur extrem kleinen Schüttlerdurchsätzen. Bei höheren Strohmassenbelegungen neigt die Schüttung im Versuchsgutbehälter zur Instabilität (Kippen), so daß mit der gewählten Massenbelegung ein Optimum zwischen möglichst hoher, den Verhältnissen auf dem Schüttler entsprechenden Massenbelegung und kleiner Streuung der Messwerte bei Versuchswiederholungen erreicht wurde. Gegenüber höheren Massenbelegungen ergeben sich für $m^* = 4 \text{ kg/m}^2$ zudem günstige Bedingungen für die zur Festlegung der Durchdringungszeit erforderliche Schnittpunktbestimmung. Wie Bild 42 zeigt, verläuft die Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ bei großen Massenbelegungen im Bereich von $\eta = 0,8$ bereits relativ flach,

so daß bereits kleine Gewichts- und Zeitmeßfehler zu erheblich unterschiedlichen Durchdringungszeiten $t_{0,8}$ führen können.

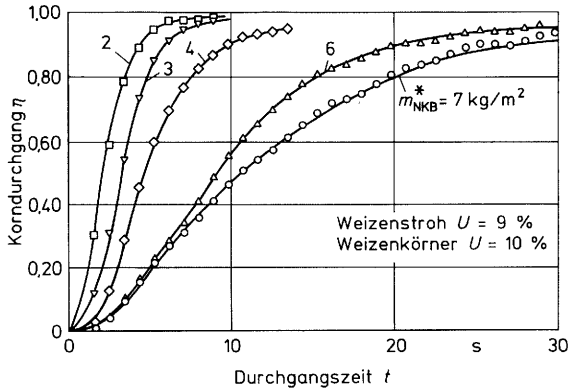


Bild 42: Korndurchgangskurven $\eta(t)$ für verschiedene Strohmassenbelegungen.

Die Kornmassenbelegung wurde zu $m^*_K = 2 \text{ kg/m}^2$ gewählt. Sie liegt damit deutlich über der auf einem realen Schüttler auftretenden Kornmassenbelegung. Nach Gl.(32) berechnet sich die Massenbelegung aus dem (breitenbezogenen) Massendurchsatz $\dot{m}'$ und der Fördergeschwindigkeit w_s .

$$m^* = \frac{\dot{m}}{b_{Tr} \cdot w_s} = \frac{\dot{m}'}{w_s} \quad (32)$$

Mit den Meßwerten aus Bild 14 (Dreschwerkwirkungsgrad) erreicht das Verhältnis zwischen Stroh- und Kornmassenbelegung auch bei extremen Durchsätzen den hier gewählten Wert von 2 nicht.

Wie Bild 43 zeigt, hängt der Verlauf der beim Entmischungsversuch ermittelten Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ nicht von der Kornmassenbelegung ab.

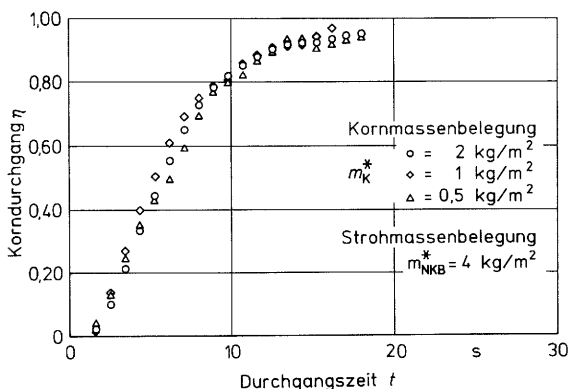


Bild 43: Verlauf der Korndurchgangsfunktion $\eta(t)$ bei verschiedenen Kornmassenbelegungen und konstanter Strohmassenbelegung.

Für den Normversuch wurde deshalb eine meßtechnisch günstige, hohe Kornmassenbelegung gewählt. Bei gleicher Genauigkeit konnte dadurch die erforderliche Gewichtsumwandlungszeit der Waage zugunsten einer größeren Anzahl von Meßwerten verringert werden. Für den Normentmischungsversuch zur Ermittlung der technologischen Stoffeigenschaft Durchdringungszeit $t_{0,8}$ wurden damit die in Tabelle 3 zusammengestellten Parameter verwendet. Mit diesen Versuchseinstellungen wurde die Eignung des Entmischungsversuches als Meßverfahren zur Bestimmung einer Stoffeigenschaft im Hinblick auf die Verteilungsfunktion der Meßergebnisse bei Versuchswiederholungen und im Hinblick auf die Standardabweichung (statistischer oder zufälliger Meßfehler) untersucht.

Es zeigte sich, daß für die Verteilungsfunktion der Meßwerte für die Durchdringungszeit $t_{0,8}$ mit hinreichender Sicherheit eine Normalverteilung nach Gauß angenommen werden kann. Bild 44 zeigt die Verteilungsfunktion einer typischen Versuchsreihe mit 20 Wiederholungen im Wahrscheinlichkeitsnetz. Der für das Vorliegen einer Normalverteilung notwendige lineare Zusammenhang wird durch die eingezeichnete Ausgleichsgerade nachgewiesen.

Erregeramplitude A_e	0,03 m
Erregerfrequenz f_e	4 Hz
Wurfkennziffer Γ	2
Strohmassenbelegung m_{NKB}^*	4 kg/m ²
Kornmassenbelegung m_K^*	2 kg/m ²
Halmlänge Stroh l_{NKB}	0,7 m
Halmschichtung	parallel
Behälterseitenlänge l	0,707 m
Vorschüttelzeit t	20 s
Versuchswiederholungen n	8

Tabelle 3: Parameter des Normentmischungsversuches zur Bestimmung der Durchdringungszeit $t_{0,8}$.

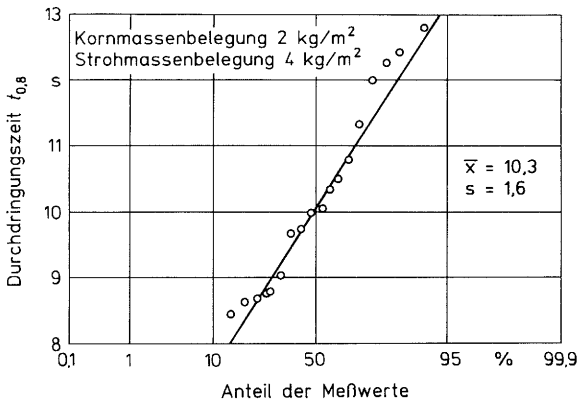


Bild 44: Verteilungsfunktion der Meßergebnisse für die Durchdringungszeit $t_{0,8}$ im Wahrscheinlichkeitsnetz.

Das Vorliegen einer Normalverteilung kann auch durch entsprechende statistische Tests nachgewiesen werden. Für die vorliegenden Ergebnisse wurde zu diesem Zweck ein Kolmogoroff-Smirnov-Test durchgeführt, wie er von Kreyszig [79] beschrieben wird. Für alle

statistischen Berechnungen wurde ein leistungsfähiger Arbeitsplatzrechner unter Verwendung von kommerziellen statistischen Rechenprogrammen [80] eingesetzt.

Das Vorliegen einer Normalverteilung erlaubt die Bestimmung einer Mindestanzahl n von Versuchswiederholungen, die zur Erzielung einer gewünschten Meßgenauigkeit erforderlich sind. Aus der Auswertung zahlreicher Versuchsreihen zur Bestimmung der Durchdringungszeit $t_{0,8}$ aus dem Entmischungsversuch, ergab sich die Standardabweichung der Grundgesamtheit zu $\sigma = 1,5$ s. Nach Kreyszig [79] ergibt sich die erforderliche Mindestanzahl n an Versuchswiederholungen, um ein 95% Konfidenzintervall ($\gamma = 0,95$) der Länge L zu erhalten nach

$$n = \left(\frac{2 \cdot c \cdot \sigma}{L} \right) \quad (33)$$

Tabelle 4 zeigt die sich aus Gl.(33) ergebenden Mindestversuchsanzahlen n , wobei L als Vielfaches der Standardabweichung σ ausgedrückt wird. Unter Berücksichtigung der für die Durchführung eines Entmischungsversuches notwendigen Zeit wurde die Mindestanzahl n an Versuchswiederholungen zur Bestimmung der Durchdringungszeit $t_{0,8}$ für die Normversuche auf $n = 8$ festgelegt.

Konfidenzzahl β	Konstante c	Intervalllänge L	Stichproben- umfang n
0,95	1,96	2σ	4
0,95	1,96	$1,5\sigma$	7
0,95	1,96	σ	15
0,99	2,576	2σ	7
0,99	2,576	$1,5\sigma$	12

Tabelle 4: Erforderliche Mindestanzahl n an Versuchswiederholungen für verschiedene Längen des Vertrauensintervalles.

5.2 Fluidisierungsversuch

5.2.1 Aufbau des Fluidisierungs-Prüfstandes

Zur Messung der Fluidisierungskurven des Reinigungsgutes wurde der in Bild 45 dargestellte Fluidisierungs-Prüfstand aufgebaut.

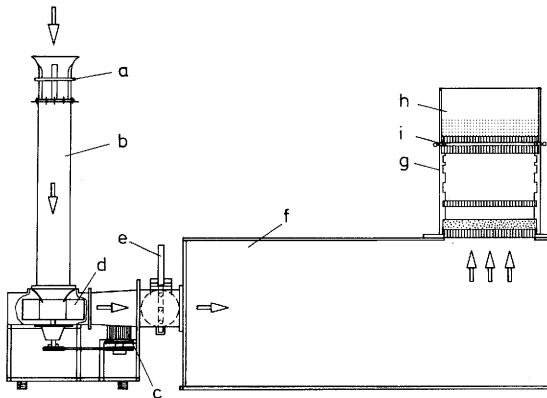


Bild 45: Aufbau des Fluidisierungs-Prüfstandes

- | | |
|------------------|-----------------------------------|
| a Einlaufmeßdüse | e Drosselklappe mit Verstellmotor |
| b Ansaugrohr | f Beruhigungsbehälter |
| c Elektromotor | g Gleichrichterkanal |
| d Radialgebläse | h Versuchsgutbehälter |
| | i Ringleitung Druckabfallmessung |

Die als Fluid dienende Umgebungsluft wird durch eine Einlaufmeßdüse (a) über ein Ansaugrohr (b) durch das von einem Elektromotor (c) angetriebene Radialgebläse (d) angesaugt. Nach der zur Einstellung des Volumenstromes (bzw. der Luftgeschwindigkeit) dienenden Drosselklappe (e) gelangt die Luft in einen großvolumigen Beruhigungsbehälter (f), von dem aus sie in den Gleichrichterkanal (g) strömt, der eine gleichmäßige Luftgeschwindigkeitsverteilung über der gesamten Querschnittsfläche des Versuchsgutbehälters (h) gewährleistet. Die Messung des Druckabfalles Δp in der Schüttung erfolgt über eine Ringleitung (i) in einem freien Querschnitt des Gleichrichterkanales (g) unterhalb des Versuchsgutbehälters (h).

Zur Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit der Luft zum Versuchsgutbehälter wird am Gebläseeinlauf eine Volumenstrommessung

nach DIN 1952 [81] durchgeführt. Mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung wird aus den bekannten Flächen der Einlaufmeßdüse und des Gleichrichterkanals die Luftgeschwindigkeit w_L aus dem Volumenstrom V nach Gleichung (34) berechnet.

$$w_L = \alpha \cdot \zeta \cdot \frac{A_D}{A_B} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_D}{\rho_L}} \quad (34)$$

Zur Druckmessung wurde ein kapazitiver Differenzdrucksensor mit einem Meßfehler von $\pm 1\%$ vom angezeigten Meßwert verwendet.

Um bei kleinen Schütthöhen eine gleichmäßige Fluidisierung der Versuchsschüttung und damit eine genaue Messung der Fluidisierungsgeschwindigkeit zu ermöglichen, muß die Luftverteilung über dem gesamten Querschnitt des Versuchsgutbehälters gleichmäßig sein. Im Gleichrichterkanal wurden deshalb Gleichrichterelemente eingebaut, deren Anordnung empirisch optimiert wurde.

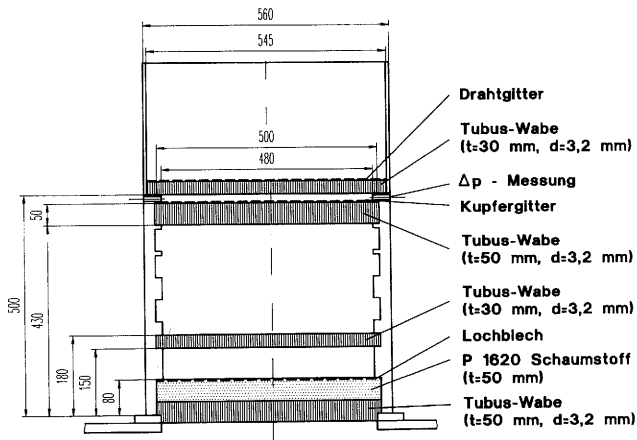


Bild 46: Gleichrichterkanal und Versuchsgutbehälter

Bild 46 zeigt die Anordnung der Gleichrichterelemente in dem Kanal mit quadratischer Querschnittsfläche. Bild 47 zeigt die dadurch erzielte Luftgeschwindigkeitsverteilung über dem Anströmboden des unbeladenen Versuchsgutbehälters. Um Durchblaslöcher am Rand des

Versuchsgutbehälters zu vermeiden, wurde dessen Grundfläche größer als die Kanalquerschnittsfläche ausgeführt, so daß eine nicht von der Luft durchströmte Randschicht entstand. Dadurch unterscheidet sich die eingefüllte Versuchsgutmasse von der effektiv durchströmten Masse nach

$$m_{S\,eff} = \frac{A_K}{A_B} \cdot m_S \quad (35)$$

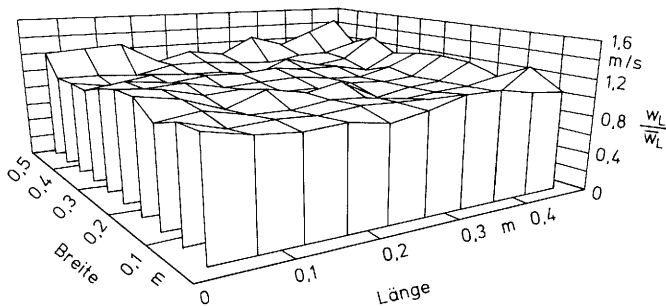


Bild 47: Luftgeschwindigkeitsverteilung über dem Anströmboden des unbeladenen Versuchsgutbehälters des Fluidisierungs-Prüfstandes.

5.2.2 Prüfstandsteuerung und Meßwerterfassung

Aus den bereits in 5.1.2 beschriebenen Gründen wurden auch der Versuchsablauf und die Prüfstandssteuerung des Fluidisierungs-Prüfstandes von einem Prozeßrechner übernommen. Bild 48 zeigt den Aufbau der verwendeten Meß- und Steuerungstechnik. Die an der Einlaufmeßdüse und im Versuchsgutbehälter gemessenen Differenzdrücke werden von Sensoren in Spannungen umgewandelt und von einem digitalen Voltmeter über einen parallelen Datenbus an den Rechner übertragen. Dieser steuert über den Digital/Analog-Wandler den Stellmotor der Drosselklappe. Der Gebläsemotor wird ebenfalls vom Rechner über ein Computerrelais geschaltet. Der Versuchsablauf kann dem Struktogramm in Bild 49 entnommen werden.

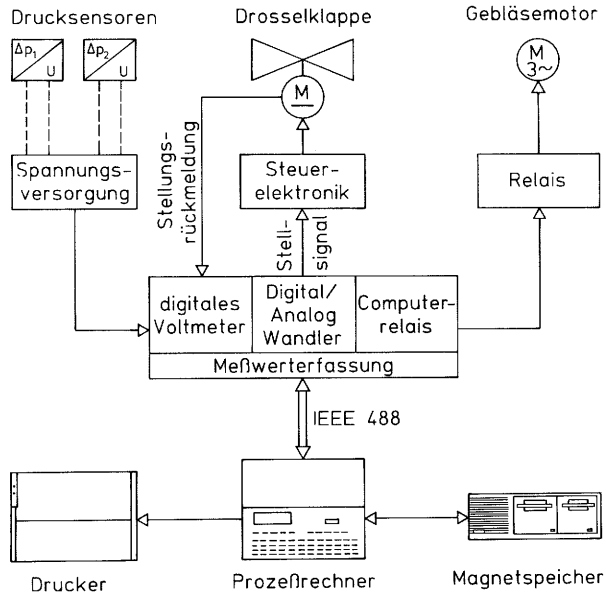


Bild 48: Aufbau der Meß- und Steuerungstechnik des Fluidisierungs-Prüfstandes.

5.2.3 Meßwertverarbeitung

Bei der Versuchsauswertung werden die charakteristischen Größen

- Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL}

und

- Fluidisierungsdruckabfall Δp_{FL}

aus der gemessenen Fluidisierungskurve berechnet. Aus den Meßwert-paaren werden mit Hilfe einer Regressionsrechnung stetige Kurven entwickelt, deren Schnittpunkte die zu bestimmenden Größen festlegen. Statt der theoretischen Gleichung (22) für den Druckabfall in der Ruheschüttung, wird für die Regressionsrechnung eine Potenzfunktion nach (36) verwendet.

$$\Delta p = a \cdot (w_L)^b \quad (36)$$

Dieser Ansatz liefert sehr gute Kurvenanpassungen an die Meßwerte.

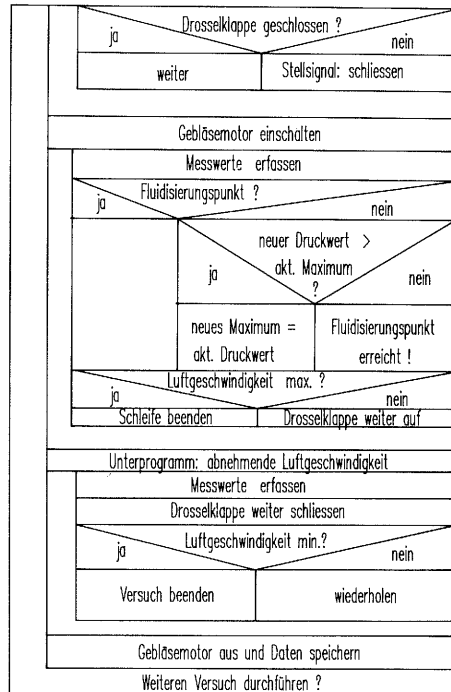


Bild 49: Programmablaufplan für den Fluidisierungsversuch.

Für die fluidisierte Schüttung werden zwei Ansätze verwendet. Zum einen wird eine Horizontale nach der theoretischen Gleichung (21) angesetzt, deren Ordinate als Mittelwert aller gemessenen Werte für den Druckabfall bei fluidisierter Schüttung berechnet wird. Da vor allem bei Spreuschüttungen statt des konstanten ein nahezu linearer Druckanstieg bei fluidisierter Schüttung beobachtet wurde, wurde außerdem für den gleichen Meßwertebereich ein linearer Ansatz nach Gl.(37) verwendet.

$$\Delta p = a + (b \cdot w_L) \quad (37)$$

Statt der Horizontalen erhält man daraus eine Gerade mit positiver Steigung und positivem Ordinatenabschnitt. Sowohl die Horizontale als auch die Gerade besitzen je einen Schnittpunkt mit den Potenz-

funktionen für die Ruheschüttung bei zu- und abnehmender Fluidgeschwindigkeit.

Bild 50 und Bild 51 zeigen typische Fluidisierungskurven für Korn- und Spreuschüttungen.

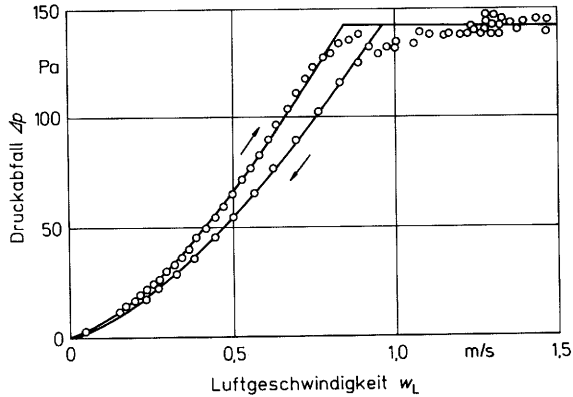


Bild 50: Fluidisierungskurve für eine Schüttung aus Weizenkörnern.

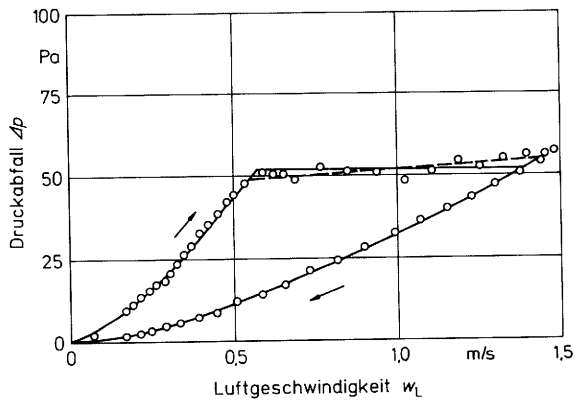


Bild 51: Fluidisierungskurve für eine Spreuschüttung.

5.2.4 Experimentelle Untersuchungen

Zum Nachweis der Eignung des Meßverfahrens zur Bestimmung der technologischen Stoffeigenschaft Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} wurden Laborversuche mit dem Fluidisierungs-Prüfstand durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Versuchsgüter mit einer statistisch relevanten Anzahl von Wiederholungen ($n \geq 10$) untersucht.

Als Versuchsgut wurde eingelagertes Kurzstrohhäcksel verwendet. Dieses Material wird bei Laborreinigungversuchen als Spreufraktion eingesetzt. Um unterschiedliche Spreuarten zu erhalten, wurde die unsortierte Ausgangsfraction in eine grobe und in eine feine Fraction sortiert, so daß zusammen mit dem Ausgangsmaterial drei verschiedene Spreuarten zur Verfügung standen. Bild 52 zeigt Versuchsgutproben der unterschiedlichen Fractionen. Als Kornfraction wurde eingelagerter Winterweizen verwendet.

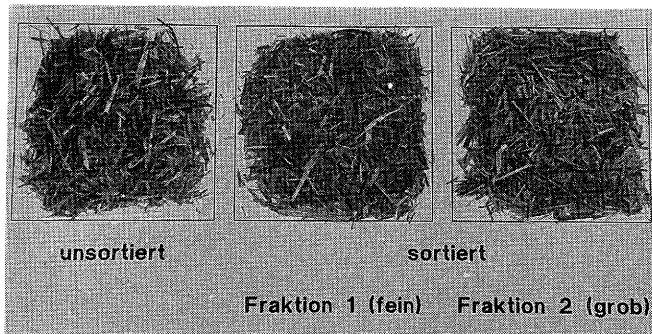


Bild 52: Versuchsgutproben der Spreufraktionen für die Laborversuche.

Es wurden die Einflüsse der folgenden Parameter auf die Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} und auf den Fluidisierungsdruckabfall Δp_{FL} untersucht:

- Versuchsgutmasse
- Kornanteil der Versuchsgutmasse
- Spreuart

Zu diesem Zweck wurden zunächst nur reine Korn- und Spreuschüttungen untersucht.

Wesentliches Kriterium für die grundsätzliche Eignung des Fluidisierungsversuches zur genauen Ermittlung der Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} und des Fluidisierungsdruckabfalles Δp_{FL} ist die Verteilungsfunktion der Meßergebnisse bei einer großen Anzahl von Versuchswiederholungen. Für alle untersuchten Spreuarten und für die Kornfraktion konnte das Vorliegen einer Normalverteilung nachgewiesen werden. In Tabelle 5 sind die Kennwerte der Verteilungsfunktion und die Ergebnisse des Kolmogoroff-Smirnow-Tests (vgl. Kreyszig [79]) angegeben. Bei n Versuchswiederholungen gibt $\bar{x}$ den Mittelwert der gemessenen Fluidisierungsgeschwindigkeiten und s^2 die Varianz der Meßwerte an. Wenn die Vergleichszahl c beim Kolmogoroff-Smirnow-Test deutlich größer als die Maximalabweichung a ist, wird das Vorliegen einer Normalverteilung mit der Irrtumswahrscheinlichkeit β bestätigt.

	Spreu			Korn
	unsortiert	grob	fein	-
$\bar{x}$	0,47	0,55	0,52	0,86
s^2	0,012	0,023	0,001	0,0001
n	15	15	15	5
a	0,116	0,171	0,126	0,339
β	5%	5%	5%	5%
c	0,338	0,338	0,338	0,563

Tabelle 5: Kennwerte der Verteilungsfunktion (Normalverteilung) für die gemessene Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} .

In Bild 53 sind beispielhaft die Versuchsergebnisse für eine Spreufraction im Wahrscheinlichkeitsnetz aufgetragen. Die sich ergebende Gerade bestätigt das Vorliegen einer Normalverteilung. Vergleichbare Ergebnisse wurden für den Fluidisierungsdruck Δp_{FL} gefunden. Die Varianz ist hier noch wesentlich kleiner, weil der

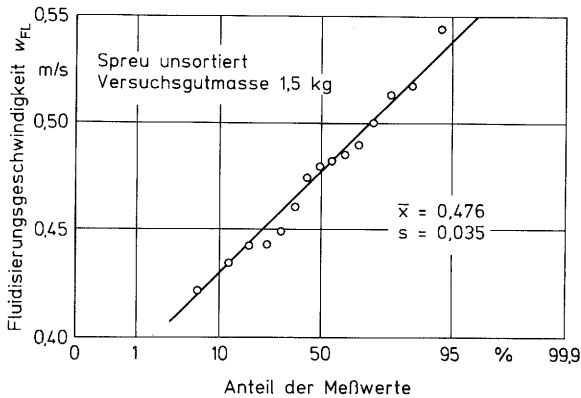


Bild 53: Versuchsergebnisse für die Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} im Wahrscheinlichkeitsnetz der Normalverteilung.

Fluidisierungsdruckabfall Δp_{FL} nur von der Versuchsgutmasse abhängt. Diese Masse kann über eine genaue Einwaage sehr gut konstant gehalten werden.

Die gemessene Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} ist praktisch unabhängig von der Versuchsgutmasse, Bild 54 und Bild 55. Nur bei sehr großen und bei sehr kleinen Versuchsgutmassen, wurden Abweichungen beobachtet, die auf veränderte Versuchsbedingungen infolge der extremen Schütthöhen im Versuchsgutbehälter zurückzuführen sind. Die Gleichheit der Fluidisierungsgeschwindigkeiten wurde mit Hilfe der Varianzanalyse und eines anschließenden Mehrfachvergleiches statistisch bestätigt [79].

Bild 56 und Bild 57 zeigen den Einfluß der Versuchsgutmasse auf den gemessenen Fluidisierungsdruckabfall Δp_{FL} . Die berechneten Werte wurden mit den Gleichungen (21) und (35) ermittelt. Die Abweichung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten bei der Kornschüttung, Bild 57, wird durch die nur ungenau zu bestimmende effektiv durchströmte Fläche des Versuchsgutbehälters verursacht (vgl. 5.2.1).

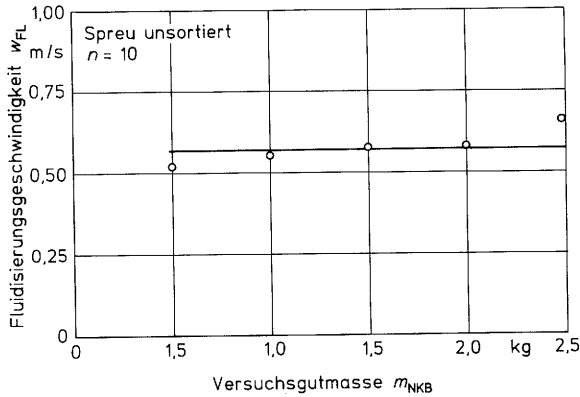


Bild 54: Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} für Spreuschüttungen bei unterschiedlicher Versuchsgutmasse.

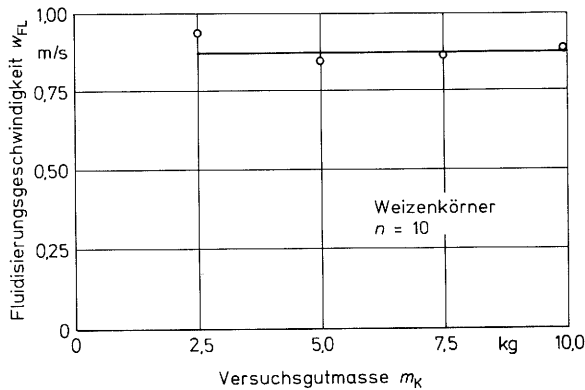


Bild 55: Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} für Kornschüttungen bei unterschiedlicher Versuchsgutmasse.

Da das Reinigungsgut im Mähdrescher stets ein Gemisch aus Korn und Spreu ist, muß für den gesuchten Zusammenhang zwischen Reinigungsleistung und Fluidisierungsgeschwindigkeit die Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} des Reinigungsgemisches bestimmt werden. Die Gemischzusammensetzung wird dabei durch den Kornanteil k charakterisiert

$$k = \frac{m_K}{m_K + m_{NKB}} = \frac{\dot{m}_K}{\dot{m}_K + \dot{m}_{NKB}} \quad (38)$$

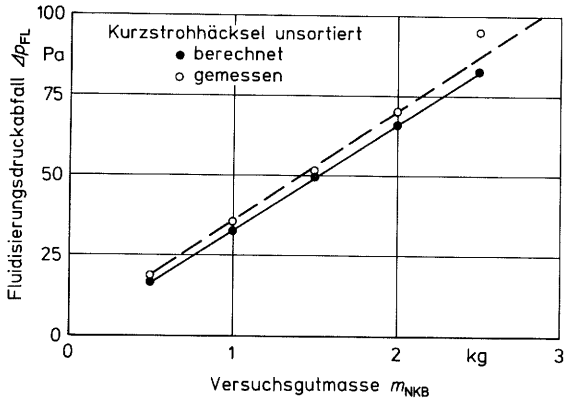


Bild 56: Einfluß der Versuchsgutmasse auf den Fluidisierungsdruckabfall Δp_{FL} bei Spreuschüttungen.

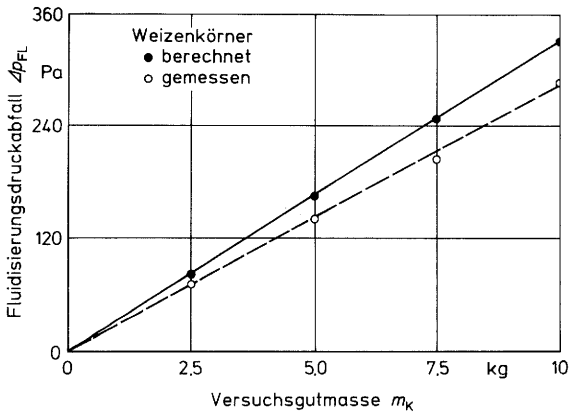


Bild 57: Einfluß der Versuchsgutmasse auf den Fluidisierungsdruckabfall Δp_{FL} bei Kornschüttungen.

Durch Laborversuche mit unterschiedlichen Korn/Spren-Gemischen wurde nachgewiesen, daß die Fluidisierungsgeschwindigkeit vom Kornmassenanteil k des Gemisches abhängt, Bild 58.

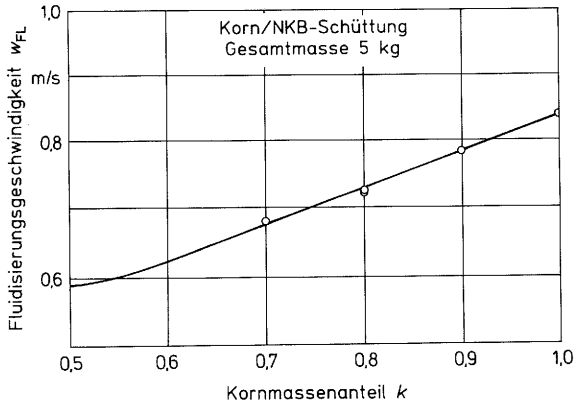


Bild 58: Fluidisierungsgeschwindigkeit w_{FL} von Korn/Spren-Gemischen in Abhängigkeit vom Kornanteil k des Gemisches.

Die Fluidisierungsgeschwindigkeit des Gemisches kann mit der empirischen Gleichung (39) aus den Fluidisierungsgeschwindigkeiten der reinen Fraktionen berechnet werden.

$$w_{FL(RG)} = w_{FL(NKB)} \cdot (1 - k)^{\frac{3}{2}} + w_{FL(K)} \cdot k \quad (39)$$

Dieses Ergebnis ist für die Durchführung der Feldversuche von Bedeutung, da auf die aufwendige Herstellung einer Versuchsgutmischung verzichtet werden kann und Fluidisierungsversuche jeweils mit den leicht verfügbaren reinen Komponenten durchgeführt werden können. Der Versuchsaufwand wird dadurch zugunsten einer größeren Versuchsanzahl wesentlich verringert.

Für die Standard-Fluidisierungsversuche wurden für die NKB-Schüttungen eine Versuchsgutmasse von $m_{NKB} = 1,5$ kg und für die Kornschüttungen eine Versuchsgutmasse von $m_K = 7,5$ kg verwendet. Die Mindestanzahl der Versuchswiederholungen war 5.

5.3 Mobiles Labor

Die Stoffeigenschaften von Mähdreschererntegut variieren nicht nur zwischen verschiedenen Beständen und Erntejahren, sondern verändern sich auch in demselben Bestand mit der Zeit. Zeitliche Veränderungen werden durch Veränderungen des Mikroklimas über der Erntefläche verursacht. Der prinzipielle Verlauf der Klimadaten während eines Tages, aber auch wesentlich kurzfristigere Schwankungen, beeinflussen vor allem die Feuchteverhältnisse im Getreidebestand und damit die Oberflächeneigenschaften des Erntegutes [13]. Bild 59 zeigt beispielhaft den Verlauf der relativen Luftfeuchte über der Tageszeit für je einen Feldversuchstag ohne Bewölkung und mit starker, wechselnder Bewölkung.

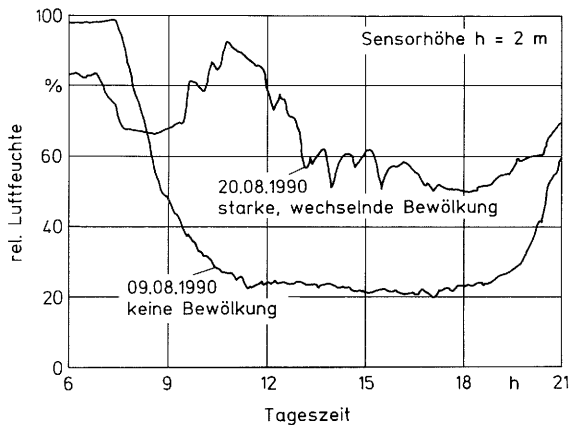


Bild 59: Verlauf der relativen Luftfeuchte über Weizenbeständen ohne und mit starker, wechselnder Bewölkung.

Werden mehrere Durchsatz/Verlust-Kennlinien in demselben Bestand zu verschiedenen Tageszeiten gemessen, ändert sich die gemessene Trennleistung, wenn zwischen den einzelnen Messungen deutliche Veränderungen der relativen Luftfeuchte auftreten [39].

Um die zur Untersuchung der Korrelation zwischen Trennleistung und Stoffeigenschaften erforderliche Zuordnung zweier unabhängiger Meßwerte zu ermöglichen, müssen beide Größen zu derselben Zeit und unter den gleichen Umgebungsbedingungen gemessen werden. Bei den

Untersuchungen von Hall u. Husman [18] und von Srivastava et al. [47] wurden die Stoffeigenschaften in einem ortsfesten Labor gemessen. Dadurch wurde ein Transport des Versuchsgutes vom Feld zum Labor erforderlich, der den Vergleich der dort gemessenen Stoffeigenschaften mit den Trennleistungen erschwerte. Um Stoffeigenschaften und Mähdrescherleistung gleichzeitig unter denselben Umgebungsbedingungen messen zu können, wurden deshalb für die vorliegende Untersuchung die Meßeinrichtungen für Stoffeigenschaften in ein mobiles Labor eingebaut, das in unmittelbarer Nähe des Versuchsmähdreschers am Feldrand aufgebaut wurde. Bild 60 zeigt eine Ansicht des mobilen Labors. Durch die geöffnete Hecktür sind links der Durchdringungszeit-Prüfstand und rechts der Fluidisierungsprüfstand zu erkennen. Um vergleichbare Klimadaten im Inneren des mobilen Labors sicherzustellen, wurde der Prüfraum von einem Axialventilator belüftet, so daß ein ständiger Luftausgleich zwischen Prüfraum und Umgebung gewährleistet war.

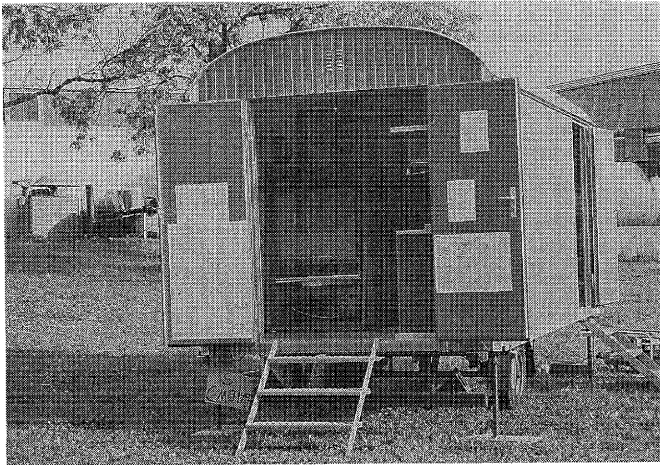


Bild 60: Mobiles Labor. Links Durchdringungszeit-Prüfstand, rechts Fluidisierungs-Prüfstand.

6 Meßverfahren für die Trennprozeßleistung

Neben den vorstehend beschriebenen Stoffeigenschaften ist die zweite zur Untersuchung der Korrelation von Stoffeigenschafts- und Leistungsänderungen erforderliche Variable die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher. Da die Trennprozeßleistung aus dem Schnittpunkt der Durchsatz/Verlust-Kennlinie des betreffenden Trennprozesses mit einem bestimmten Kornverlustniveau ermittelt wird, mußten diese Durchsatz/Kennlinien an einem Versuchsmähdrescher für die Trennprozesse Reinigung und Schüttler gemessen werden. Parallel zur Messung der Durchsatz/Verlust-Kennlinien wurden die Stoffeigenschaften des Erntegutes im mobilen Labor unter denselben Umgebungsbedingungen gemessen.

Zur Ermittlung der Durchsatz/Verlust-Kennlinie müssen die Größen Massendurchsatz m und Kornverlust V_K erfaßt werden. Beide Größen können nicht kontinuierlich während des Betriebes gemessen werden, so daß die stetige Durchsatz/Verlust-Kennlinie eines Trennprozesses nicht gemessen werden kann. Mit dem hier beschriebenen Meßverfahren werden deshalb diskrete Punkte der Durchsatz/Verlust-Kennlinie ermittelt und daraus mit einem geeigneten Verfahren die stetige Kurve berechnet.

6.1 Versuchsmähdrescher

Als Versuchsmähdrescher wurde ein serienmäßiger Mähdrescher der mittleren Leistungsklasse verwendet. Die wesentlichen technischen Daten und Einstellungen sind in Tabelle 6 zusammengefaßt.

Die in Tabelle 6 beschriebenen Einstellungen wurden für alle durchgeführten Versuche unverändert verwendet. Damit wurde sichergestellt, daß Veränderungen im Verlauf der gemessenen Durchsatz/-Verlust-Kennlinien der Trennprozesse ausschließlich auf die Parameter Stoffeigenschaften und Erntebedingungen zurückzuführen waren, vgl. Bild 3.

Um sowohl die Durchsatz/Verlust-Kennlinie des Korn/Spreu-Trennprozesses (Reinigungsanlage) als auch die des Korn/Stroh-Trennprozesses (Schüttler) zu erhalten, wurden am Versuchsmähdrescher die folgenden Werte gemessen:

Dreschtrommel	
Durchmesser	600 mm
Breite	1100 mm
Schlagleistenzahl	8
Drehzahl	955 min ⁻¹
Umfangsgeschwindigkeit	30 m/s
Dreschkorb	
Korbleistenzahl	15
Umschlingungswinkel	115 °
Korbfläche	0,71 m ²
Schüttler	
Hordenzahl/Fallstufenzahl	5/4
Breite	1100 mm
Länge	3300 mm
Fläche	3,63 m ²
Neigung	6 °
Reinigungsanlage	
Vorbereitungsbodenschwingung	gleichsinnig zu den Sieben
Gebläsebauart	radial, beidseitig ansaugend
Gebläsedrehzahl	600 min ⁻¹
Breite	1000 mm
Obersieb/Öffnung	Lamelle / 12 mm
Länge	1300 mm
Fläche	1,3 m ²
Untersieb	Rundloch / 11mm
Länge	1150 mm
Fläche	1,15 m ²
Überkehr	auf Vorbereitungsboden

Der Versuchsmähdrescher wurde freundlicherweise von der Firma KHD-Agratechnik GmbH/Lauingen zur Verfügung gestellt. Dafür sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Tabelle 6: Technische Daten und Einstellungen der Dresch- und Trennelemente des Versuchsmähdreschers.

- gesamter Kornmassendurchsatz $\dot{m}_{K(ges)}$
- NKB-Massendurchsatz der Korn/Sprenu-Trennung (Reinigungsanlage) $\dot{m}_{NKB(Ra)}$
- Verlustkornmassenstrom der Korn/Sprenu-Trennung (Reinigungsanlage) $\dot{m}_{VK(Ra)}$
- NKB-Massendurchsatz der Korn/Stroh-Trennung (Schüttler) $\dot{m}_{NKB(Tr)}$
- Verlustkornmassenstrom der Korn/Stroh-Trennung (Schüttler) $\dot{m}_{VK(Tr)}$

Da eine direkte Durchsatzmessung nicht oder nicht mit der erforderlichen Genauigkeit möglich ist, wurden die Massendurchsätze gemessen, indem während einer stationären Betriebsphase der Trennelemente die anfallende Kornmasse und die über das Ende der Trennelemente hinaus geförderten Massen für eine bestimmte Zeit vollständig aufgefangen wurden. Die Wägung der aufgefangenen Massen und eine Division durch die Auffangdauer ergaben die gesuchten mittleren Massendurchsätze.

Zur Ermittlung der Verlustkornmasse wurden die in den aufgefangenen NKB-Massen enthaltenen Körner mit einem in Hohenheim seit vielen Jahren angewandten Nachtrennverfahren abgetrennt, Wacker [82]. Das Verhältnis des aus der abgetrennten Kornmasse bestimmten Kornmassenstromes $\dot{m}_{VK}$ zum gesamten Kornmassendurchsatz $\dot{m}_{K(ges)}$ ergibt den prozentualen Kornverlust des jeweiligen Trennprozesses.

Zur Bestimmung des gesamten Kornmassendurchsatzes $\dot{m}_{K(ges)}$ wird der Körnerstrom aus der Korntankbefüllschnecke durch Umschalten einer hydraulisch betätigten Gutweiche während der Auffangzeit in einen separaten Meßbehälter geleitet, Bild 61. Der Meßbehälter ist im Korntank zur Wägung an einer Kraftmeßdose aufgehängt. Wegen der begrenzten Größe des Meßbehälters wurde die Kornmasse während eines Versuches nur zehn Sekunden lang aufgefangen (Trennelementübergänge 15 Sekunden). Da die Auffangzeit einen Ausschnitt aus einer stationären Betriebsphase darstellt, wird die Genauigkeit der Kornmassendurchsatz-Messung dadurch nicht beeinträchtigt. Aus dem gleichen Grunde wurde auf einen zeitlichen Versatz zwischen

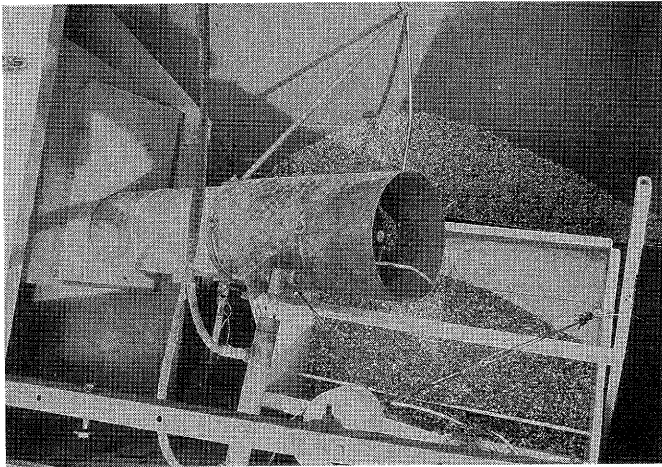


Bild 61: Bestimmung des Kornmassenstromes. Gutweiche im Korntank des Versuchsmähdreschers.

Auffangen der Kornmasse und Auffangen der Trennelementübergänge verzichtet.

Die Einrichtungen zum Auffangen der Trennelementübergänge am Versuchsmähdrescher sind in Bild 62 dargestellt. Der Übergang der Reinigungsanlage wird aufgefangen, indem am Ende der Reinigungsanlage, unterhalb des Siebkastens, ein Auffangsack (f) hydraulisch (g) aufgeklappt wird. Nach Ende der Auffangzeit wird der Auffangsack wieder geschlossen. Zur Bestimmung der NKB-Masse wird der Auffangsack ausgehängt und in einer Vorrichtung gewogen.

Bei der Bergung des Schüttlerüberganges müssen große Strohvolumina in einen Auffangbehälter gefördert werden. Für den Auffangvorgang wird deshalb an den Versuchsmähdrescher ein aus einem Horizontal- und einem Schrägförderband bestehender mobiler Querförderer angehängt, Bild 63. Während der Einlaufphase läuft das Horizontalförderband (b) nach rechts und legt den Schüttlerübergang auf dem Feld ab. Nach Erreichen der stationären Betriebsphase wird der elektrische Bandantrieb durch Drehrichtungsumkehr des

Elektromotors (e) umgeschaltet. Der Schüttlerübergang wird dann zum Schrägförderband (a) gefördert und gelangt von dort auf einen nebenherfahrenden Wagen. Am Ende des Auffangvorganges wird die Drehrichtung des Horizontalförderbandes (b) erneut umgeschaltet.

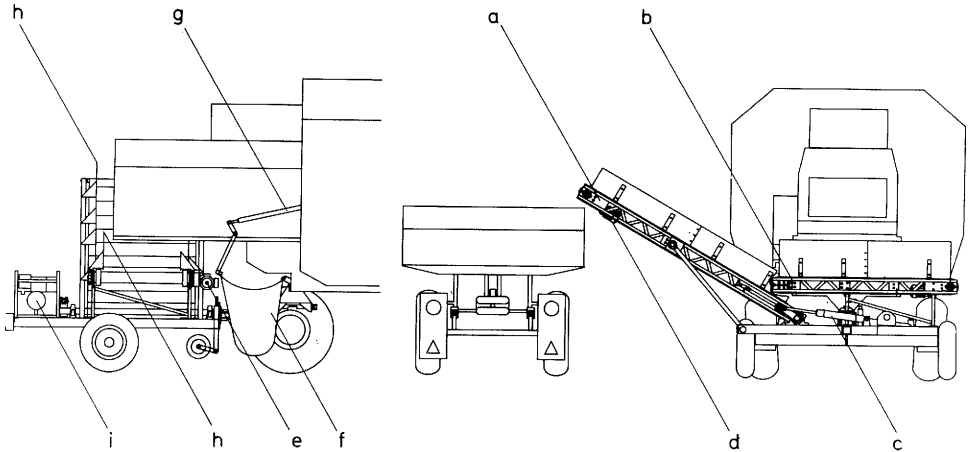


Bild 62: Einrichtungen zum Auffangen der Trennelementübergänge am Versuchsmähdrescher.

a	Schrägförderband	g	Sacköffnungszyylinder
b	Horizontalförderband	h	Strohleitbleche
c	Schwenkzylinder	i	Stromerzeuger
d,e	Elektromotor	j	Auffangwagen
f	Auffangsack		

Die Ladefläche des Auffangwagen ist mit einer Plane ausgekleidet, die mit Hilfe einer am Frontlader eines Ackerschleppers eingehängten Vorrichtung zum Entladen angehoben werden kann. Eine am Frontlader angebrachte elektronische Waage erlaubt die Messung der aufgefundenen Massen.

Die Steuerung des Versuchsablaufes und die Messwerterfassung am Versuchsmähdrescher werden von einem Prozessrechner übernommen.

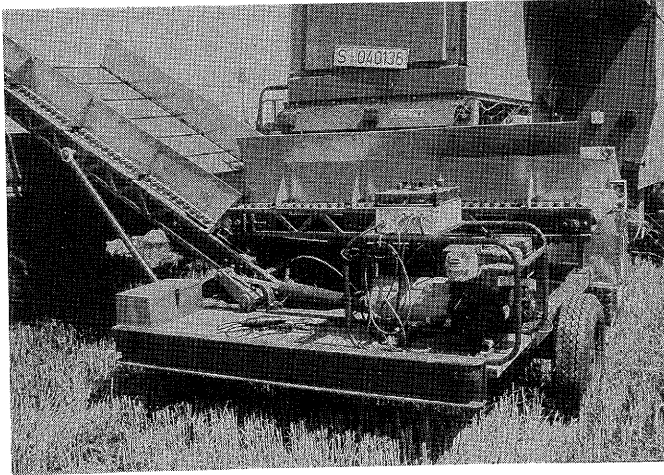


Bild 63: Mobiler Querförderer zur Bergung des Schüttlerüberganges am Versuchsmähdrescher.

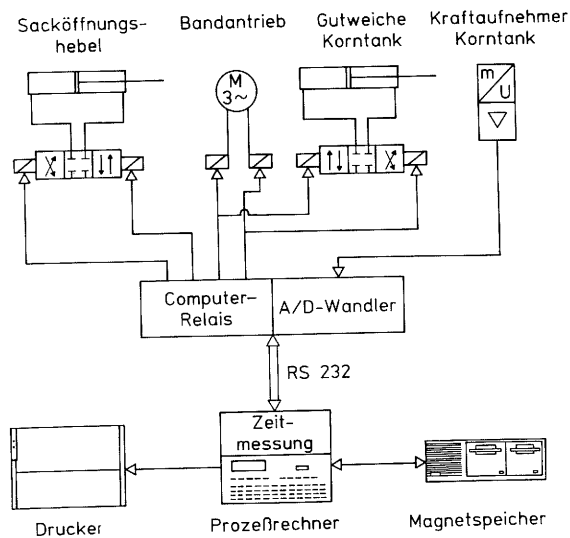


Bild 64: Aufbau der Steuerung und Meßwerterfassung am Versuchsmähdrescher.

Dadurch wird eine reproduzierbare Zuordnung der Öffnungs- und Schließzeitpunkte und eine genaue Einhaltung der Auffangzeiten gewährleistet. Der prinzipielle Aufbau der Steuerung und Meßwert- erfassung ist in Bild 64 dargestellt. Der Versuchsablauf kann Bild 65 entnommen werden.

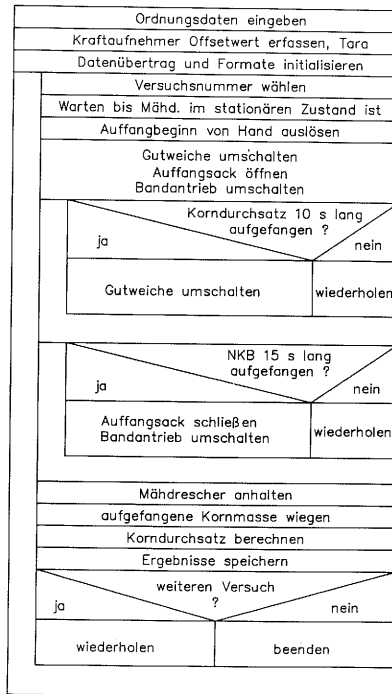


Bild 65: Programmablaufplan des Steuerprogrammes für den Prozeß- rechner auf dem Versuchsmähdrescher.

Zur Bestimmung der in den Übergängen von Reinigungsanlage und Schüttler des Versuchsmähdreschers enthaltenen Verlustkornmasse, wurde eine umgebaute Ständdreschmaschine als Nachtrennmaschine eingesetzt. Die Nachtrennmaschine ist mit einem Schwingschüttler und mit einer konventionellen Flachsieb-Reinigungsanlage

ausgerüstet. Zur Ermittlung der Trennverluste wird das Material unter Umgehung der Dreschtrommel direkt auf den Schüttler aufgegeben. Die abgetrennten Körner werden unterhalb der Reinigungsanlage in einem Behälter gesammelt. Das Fehlen von Fördereinrichtungen und eine spezielle Abdichtung aller Übergänge erlauben eine genaue Bestimmung der Verlustkornmasse.

6.2 Stetige Durchsatz/Verlust-Kennlinie und Trennprozeßleistung

Für die Bestimmung der Leistung eines Trennprozesses im Mähdrescher ist es von entscheidender Bedeutung, die Durchsatz/Verlust-Kennlinie als Funktion des Kornverlustes V_k vom Massendurchsatz m zu kennen. Da die Trennverluste zu hohen Massendurchsätzen hin exponentiell zunehmen, ist der Zusammenhang dieser beiden Größen nichtlinear. Das Einzeichnen einer Ausgleichskurve durch die Meßpunkte nach Augenmaß, das bei linearen Zusammenhängen sehr gute Ergebnisse liefert, ist bei der Ermittlung der Durchsatz/Verlust-Kennlinien weniger geeignet und sollte möglichst durch einen Regressionsalgorithmus ersetzt werden. Neben der Frage der Ermittlung eines stetigen funktionalen Zusammenhanges, ist eine Abschätzung der statistischen Genauigkeit des so ermittelten Zusammenhanges für die Beurteilung der Genauigkeit und der möglichen Auflösung bei der Messung der Trennleistung sinnvoll. Diesen Fragen wurde deshalb besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Zu diesem Thema sei besonders auf die Abhandlung von Hall [83] verwiesen.

Aus Sicht der Statistik liegen für die Ermittlung der Durchsatz/-Verlust-Kennlinien der Trennprozesse im Mähdrescher aus einzelnen Meßpunkten sehr ungünstige Bedingungen vor. Das Hauptproblem stellt vor allem die typischerweise nur kleine mögliche Anzahl der Meßwerte dar. Entsprechende Normentwürfe [84] für die Leistungsmessung an Mähdreschern nennen eine Mindestanzahl von fünf Durchsatz/Verlust-Meßpunkten, um eine vollständige Kennlinie bestimmen zu können. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurden in der Regel mehr Meßpunkte (6-8) für die Berechnung einer Durchsatz/-Verlust-Kennlinie aufgenommen. Eine an sich wünschenswerte, größere Anzahl von Meßpunkten konnte nicht erreicht werden, da die für eine Durchsatz/Verlust-Kennlinie erforderlichen Meßpunkte

innerhalb kurzer Zeit gemessen werden sollten, um Einflüsse aus Witterungsänderungen auszuschließen.

Für die Bestimmung der stetigen Durchsatz/Verlust-Kennlinie wurde ein Rechenprogramm entwickelt, das eine Regressionsrechnung zur Anpassung einer nichtlinearen Modellfunktion an die Meßpunkte ermöglicht. Als Modellfunktion für die Durchsatz/Verlust-Kennlinien wurden die Gleichungen (40) - (42) eingesetzt, vgl. Spiess [10] und Wrubleski u. Nyborg [9].

$$V_K = a \cdot m^b \quad (40)$$

$$V_K = a \cdot e^{(b \cdot m)} \quad (41)$$

$$V_K = e^{(a + b \cdot m + c \cdot m^2)} \quad (42)$$

In der Regel wurde die Gleichung (42) verwendet. Bei großen Meßwertstreuung wurde aus Gründen der schnelleren Konvergenz Gl.(40) und Gl.(41) eingesetzt. Der verwendete numerische Algorithmus entspricht dem von Marquardt [85] entwickelten Verfahren.

Mit dem oben beschriebenen Verfahren wird, statistisch betrachtet, nicht die wahre Kurve ermittelt, sondern die "beste" Annäherung an diese Kurve. Diese Näherung ist umso besser, je größer die Anzahl der Meßpunkte ist. Durch die Angabe eines Vertrauensbereiches (Konfidenzintervall) für die bei der Regressionsrechnung angepaßten Parameter der Modellfunktion, kann die Genauigkeit der ermittelten Kurve abgeschätzt werden. Für die Berechnung der Konfidenzintervalle wurde ein Algorithmus von Bates u. Watts [86] verwendet, dessen Kernstück eine sogenannte Householder Transformation ist.

Graphisch anschaulich kann die berechnete Durchsatz/Verlust-Kennlinie dadurch von zwei Hüllkurven umgeben werden. Dadurch entsteht ein Bereich in dem mit statistischer Sicherheit die wahre (unbekannte!) Kurve liegen muß, Bild 66. Die Breite dieses Vertrauensintervalles (Konfidenzband) hängt zum einen von der Konfidenzzahl γ , einer Zahl, die die gewünschte statistische Sicherheit ausdrückt und zum anderen von der Streuung der tatsächlichen Meßwerte ab.

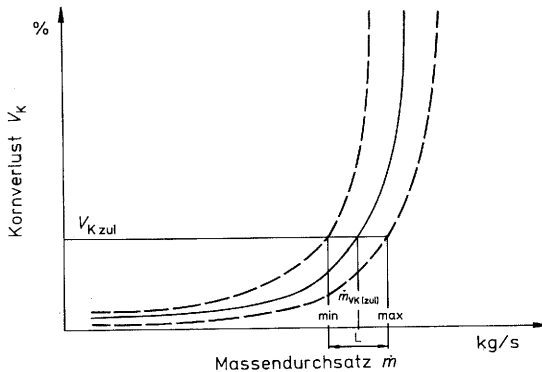


Bild 66: Durchsatz/Verlust-Kennlinie mit Konfidenzband und Vertrauensintervall der Trennleistung.

Die berechneten Hüllkurven erlauben nun eine quantitative Abschätzung der Genauigkeit der aus der Durchsatz/Verlust-Kennlinie ermittelten Trennprozeßleistung. Bild 66 zeigt, daß die Verlusthorizontale alle drei Kurven schneidet, so daß auf der Abszisse auch ein Intervall für die Trennprozeßleistung entsteht. Dieses Intervall entspricht anschaulich etwa der Konfidenzintervalllänge L , vgl. [79], wenn der Schnittpunkt mit der mittleren Kurve der besten Näherung als Mittelwert einer Verteilung aufgefaßt wird.

Zur Veranschaulichung der bei der Bestimmung der Durchsatz/Verlust-Kennlinien vorliegenden Bedingungen sind in **Bild 67** und **Bild 68** zwei typische Fälle dargestellt. Bild 67 zeigt einen Durchsatz/Verlust-Kennlinie, die aus einer Meßpunktreihe mit kleiner Streuung berechnet wurde zusammen mit dem 90% Vertrauensbereich (Konfidenzintervall), Bild 68 zeigt eine entsprechende Durchsatz/Verlust-Kennlinie für eine Meßpunktreihe mit großer Streuung.

Für die vorliegenden Versuche wurde das Verlustniveau zur Bestimmung der Trennprozeßleistung in Übereinstimmung mit Spiess [10] und Srivastava et al. [47] für den Schüttler zu $V_{K(zul)} = 1\%$ und für die Reinigungsanlage zu $V_{K(zul)} = 0,5\%$ gewählt.

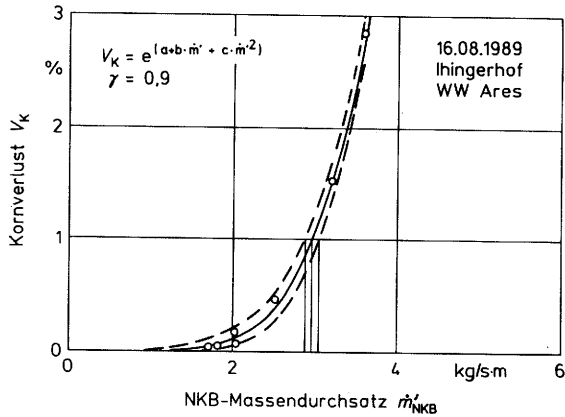


Bild 67: Durchsatz/Verlust-Kennlinie des Schüttlers im Versuchsmähndrescher mit 90% Vertrauensintervall für eine Meßpunktreihe mit kleiner Streuung.

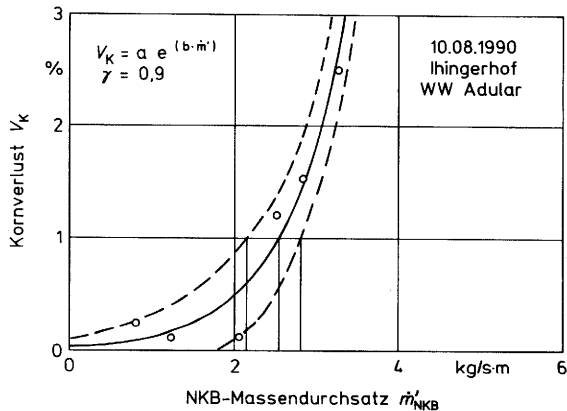


Bild 68: Durchsatz/Verlust-Kennlinie des Schüttlers im Versuchsmähndrescher mit 90% Vertrauensintervall für eine Meßpunktreihe mit großer Streuung.

Wesentlich für die Beurteilung der in Kapitel 7 dargestellten Korrelationen ist die auf diese Weise ermittelte meßtechnisch mögliche Genauigkeit bei der Leistungsmessung der Trennprozesse im Versuchsmähdrescher. Die Genauigkeit der Messung der Trennprozeßleistung ergibt sich demnach etwa zu:

- Schüttler $\dot{m}'_{NKB(1\%)} \pm 10\%$
- Reinigungsanlage $\dot{m}'_{NKB(0,5\%)} \pm 15\%$
 $\dot{m}'_{K(0,5\%)} \pm 15\%$

7 Ergebnisse der Feldversuche

7.1 Schüttlerleistung und Durchdringungszeit

Zur experimentellen Überprüfung der in Kapitel 4.2 entwickelten Modellvorstellung einer Korrelation zwischen der Schüttlerleistung und der Durchdringungszeit wurden in den Jahren 1989 und 1990 Feldversuche in Weizenbeständen mit einem Versuchsmähdrescher und mit dem Durchdringungszeit-Prüfstand durchgeführt. Die bei diesen Versuchen gemessenen Durchsatz/Verlust-Kennlinien des Schüttlers im Versuchsmähdrescher sind in Bild 69 für das Versuchsjahr 1989 und in Bild 70 für das Versuchsjahr 1990 dargestellt.

Mit dem Versuchsmähdrescher wurden deutlich unterschiedliche Durchsatz/Verlust-Kennlinien gemessen, so daß eine Aussage zu möglichen Korrelationen für einen verhältnismäßig großen Schüttlerleistungsbereich möglich wurde.

Erntemaschinenprüfstand

Vor Beginn der eigentlichen Feldversuche wurden die Durchsatz/Verlust-Kennlinien des Schüttlers an einem Erntemaschinenprüfstand (vgl. Wacker [82]) im Labor mit eingelagerten Material ermittelt. Wegen der exakt kontrollierbaren Versuchsbedingungen und der Gleichartigkeit des Materials von Einzelversuch zu Einzelversuch wurden im Labor Durchsatz/Verlust-Kennlinien mit geringer Streuung der Meßwerte und dadurch guter Genauigkeit der Leistungsbestimmung ermittelt. Wegen der Ungleichmäßigkeit der Stoffeigenschaften in natürlichen Getreidebeständen, ließen sich ähnlich hohe Genauigkeiten bei den Feldversuchen nicht in allen Fällen verwirklichen.

Feuchtweizenbestände

Zu Beginn beider Feldversuchsperioden wurden die Durchsatz/Verlust-Kennlinien des Versuchsmähdreschers in Feuchtweizenbeständen gemessen (Bild 69: 4. und 5.8.1989, Bild 70: 2. und 3.8.1990). Wegen der extremen NKB-Feuchtegehalte müssen diese Versuche getrennt betrachtet werden. Die NKB-Massendurchsätze und damit die Schüttlerleistungen liegen bei diesen Versuchen etwa um den Faktor zwei höher als in trockenen Weizenbeständen.

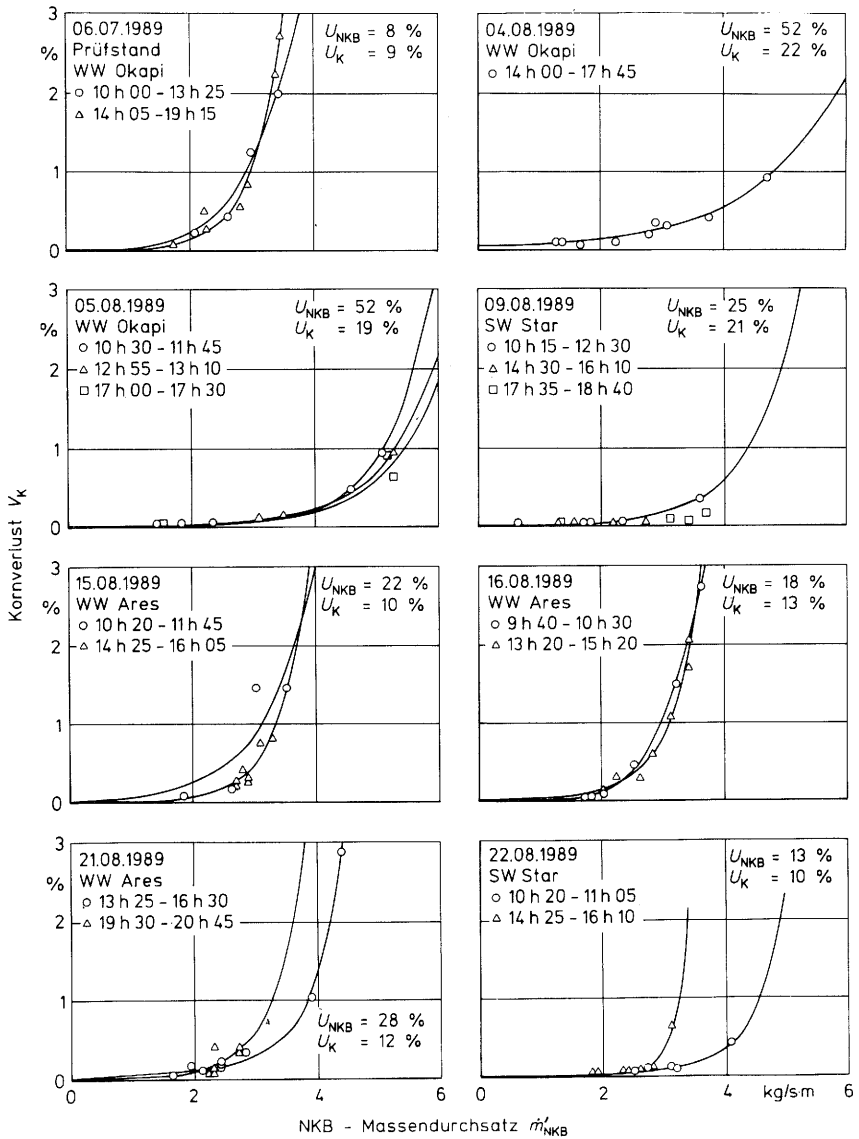


Bild 69: Durchsatz/Verlust-Kennlinien des Schüttlers im Versuchsmähdrescher für das Versuchsjahr 1989.

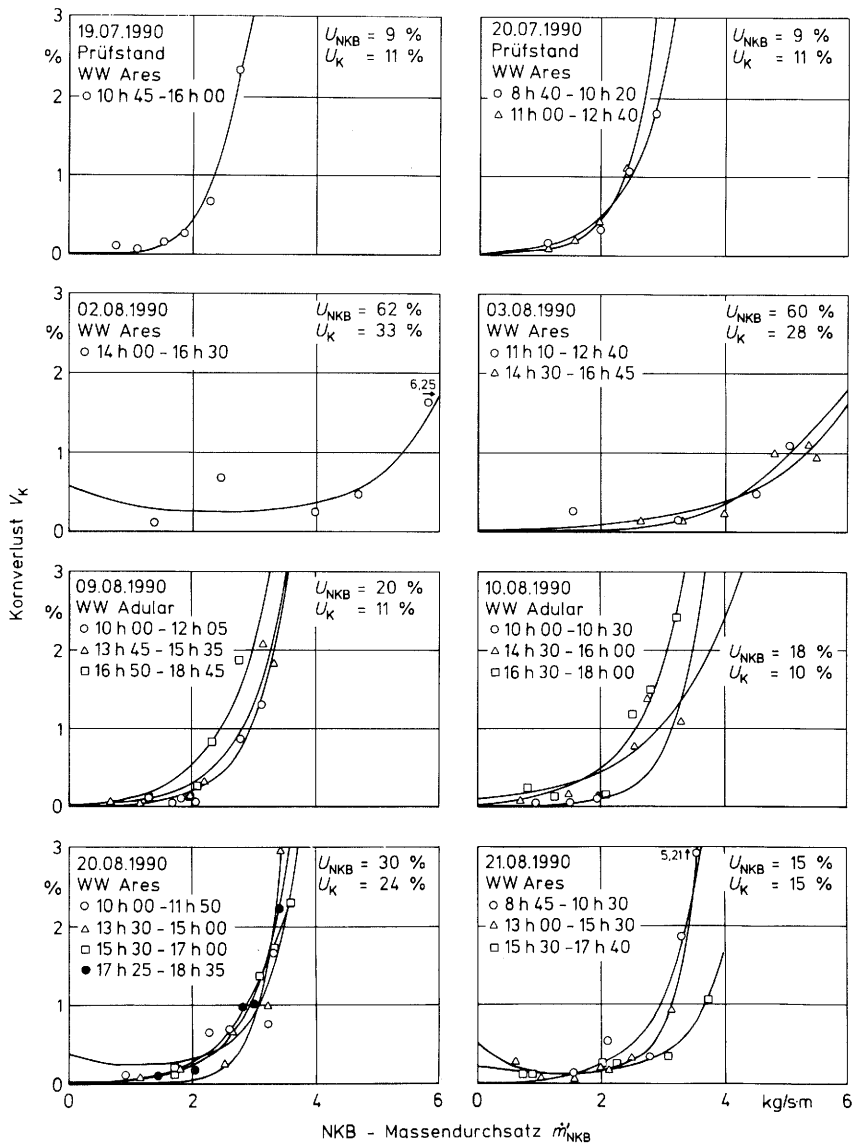


Bild 70: Durchsatz/Verlust-Kennlinien des Schüttlers im Versuchsmähdrescher für das Versuchsjahr 1990.

Dieses Phänomen tritt wegen der infolge der hohen Gutfeuchte ebenfalls hohen Schüttdichte des Strohs auf. Da der Verlauf der Kornabscheidefunktion und damit das Verlustverhalten des Schüttlers vom Weg abhängt, den die Einzelkörner aus der Strohmatte bis zur Trennfläche zurücklegen müssen, ist das Strohvolumen auf dem Schüttler die maßgebliche Variable. Das Strohvolumen kann nur dann durch die Strohmassenbelegung ersetzt werden, wenn die Schüttdichte des Strohs konstant ist. Meßtechnisch kann nur der Strohmassendurchsatz, nicht aber der Strohvolumendurchsatz eines Mähdreschers bestimmt werden. In der Praxis werden die Kornverluste deshalb über dem NKB-Massendurchsatz aufgetragen. Vergleichbare Werte werden auf diese Weise nur bei übereinstimmender Schüttdichte des Strohs erzielt. Da die Schüttdichte des Strohs im wesentlichen vom Wassergehalt, also von der mittleren Gutfeuchte abhängt, müßte der Massendurchsatz auf einen Trockenmassen-Durchsatz zurückgerechnet werden oder über die Schüttdichte in einen Stroholumendurchsatz umgewandelt werden.

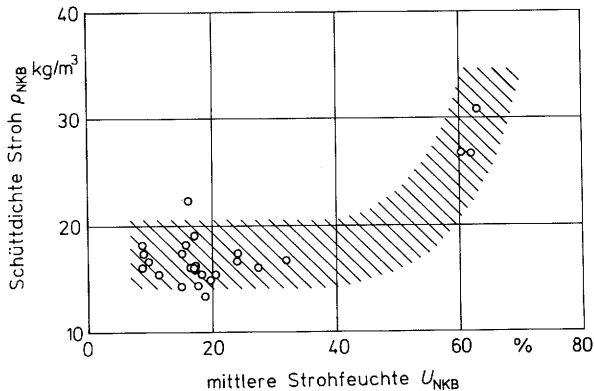


Bild 71: Schüttdichte des Strohs im Versuchsgutbehälter des Durchdringungszeit-Prüfstandes über dem Strohfeuchtegehalt.

Eine reproduzierbare Schüttdichtebestimmung von gedroschenem Stroh ist in der Praxis nicht möglich. Für die hier vorliegenden Versuche wurde ein Referenzwert aus der Schüttdichte paralleler Halme im Versuchsgutbehälter des Durchdringungszeit-Prüfstandes

gebildet. Die so ermittelten Schüttdichten sind in Bild 71 über der mittleren Strohfeuchte ausgetragen.

Bei der meßtechnisch erzielbaren Genauigkeit der Dichte- und der Feuchtegehaltsmessung (Ofentrocknung, 24 Stunden, 105°C) zeigt sich, daß die Schüttdichte über einen weiten Bereich unabhängig von der mittleren Gutfeuchte ist. Erst bei extremen Gutfeuchten steigt sie deutlich an. Dies bedeutet, daß die über dem Massendurchsatz aufgetragenen Durchsatz/Verlust-Kennlinien in trockenen Beständen (U_{NKB} bis 30%) direkt vergleichbar sind. Die in Feuchtheizen gemessenen Durchsatz/Verlust-Kennlinien sind gesondert zu betrachten.

Mit der Gutfeuchtedefinition nach Gleichung (43) verhalten sich die Trockenmassendurchsätze und damit auch die Volumina wie in Gleichung (44) angegeben.

$$U = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{ges}}} = \frac{m_{\text{Wasser}}}{m_{\text{trocken}} + m_{\text{Wasser}}} \quad (43)$$

$$\frac{m_{\text{trocken1}}}{m_{\text{trocken2}}} = \frac{(1 - U_1)}{(1 - U_2)} \quad (44)$$

Das Verhältnis der möglichen Massendurchsätze (Schüttlerleistungen) ist damit für trockene (U_{NKB} ungefähr 20%) und feuchte (U_{NKB} ungefähr 60%) Weizenbestände ungefähr zwei.

Trockene Weizenbestände

Die Durchsatz/Verlust-Kennlinien in trockenen Weizenbeständen konnten in der Regel mit zufriedenstellender Genauigkeit ermittelt werden. Lediglich bei Versuchen in Sommerweizenbeständen konnten die Massendurchsätze infolge kurzer Halme und lichter Bestände nicht soweit gesteigert werden, daß nennenswerte Kornverluste auftraten. Begrenzende Faktoren waren die verfügbare Schneidwerksbreite und die mögliche Fahrgeschwindigkeit.

Durchdringungszeiten

Die Durchdringungszeiten wurden nach der in 5.1 beschriebenen Methode für jede Schüttlerkennlinie mit der erforderlichen Anzahl an Wiederholungen durchgeführt. Wie bereits im Labor nachgewiesen, konnte dadurch jeweils ein zuverlässiger Mittelwert mit guter Genauigkeit ermittelt werden.

Korrelationen

Ein Teil der Versuchsergebnisse des Jahres 1989 wurde bereits in einer ersten Veröffentlichung dargestellt, [87]. Das dort gezeigte Diagramm ist in Bild 72 wiedergegeben.

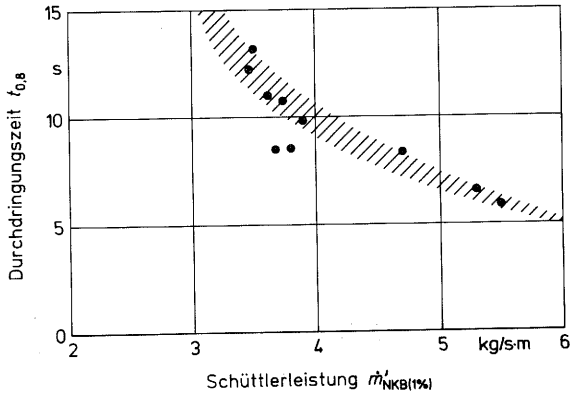


Bild 72: Schüttlerleistung und Durchdringungszeit für die Feldversuche 1989 nach [87].

Die dargestellte Korrelation wird wesentlich von den rechtsliegenden in Feuchtweizenbeständen ermittelten Punkten bestimmt. Entsprechend der Messung der Durchsatz/Verlust-Kennlinie in Abhängigkeit vom Massendurchsatz, wurde die Massenbelegung bei den zugehörigen Durchdringungszeitversuchen konstant gehalten. Dies führte zu einer niedrigeren Schütthöhe im Versuchsgutbehälter, als bei den Versuchen in trockenen Weizenbeständen. Wie Bild 22 und Bild 40 zeigen, steigt die Durchdringungszeit mit zunehmender Massenbelegung überproportional an. Da bei diesen Versuchen Stroh

gleicher Feuchte bzw. Schüttdichte verwendet wurde, kann auf der Abszisse die Massenbelegung durch das Strohvolumen ersetzt werden. Auch beim Durchdringungszeit-Prüfstand wird das Betriebsverhalten wie beim Schüttler vom Strohvolumen und nicht von der Massenbelegung bestimmt. Dies bedeutet, daß bei konstanter Massenbelegung, aber deutlich höherer Schüttdichte (Strohfeuchte), wie es bei Feuchtweizen der Fall ist, der Betriebspunkt des Durchdringungszeitversuches in Bild 22 bzw. Bild 40 auf der Kurve nach links wandert (in Richtung niedrigerer Strohvolumina). In [87] wurde angenommen, daß sich der dadurch entstehende Effekt auf die gemessene Durchdringungszeit und das infolge der Dichteänderung erhöhte Massendurchsatzniveau auf dem Schüttler gegenseitig kompensieren, die Wertepaare also zusammen mit den Versuchen in trocknen Beständen betrachtet werden können. Diese Annahme hat sich als falsch erwiesen und führte zu der dargestellten Scheinkorrelation. Da der Massendurchsatz bei gleichem Strohvolumen mit zunehmender Strohdichte linear ansteigt, die Durchdringungszeit $t_{0,8}$ aber nach einer Potenzfunktion (vgl. Bild 22 und Bild 40) abnimmt, wenn das Strohvolumen durch Vergrößerung der Dichte abnimmt, wird der Kurvenverlauf aus Bild 22 bzw. Bild 40 in Bild 72 wiedergegeben, da sowohl die Variable $t_{0,8}$ als auch die Schüttlerleistung, ausgedrückt als Massendurchsatz, von der Strohdichte abhängen. Statt eines von den Stoffeigenschaften herrührenden Unterschiedes der Durchdringungszeit $t_{0,8}$ (unterschiedliche Kurvenverläufe in Bild 22) wird bei dieser Vorgehensweise auch ein anderer Betriebspunkt der Kurve betrachtet. Der Stoffeigenschaftseinfluß wird dadurch von einem weiteren Effekt überlagert.

Um Versuche bei stark unterschiedlicher Schüttdichte des Stroh in einer Korrelation verwenden zu können, müßte der Durchdringungszeitversuch statt mit konstanter Massenbelegung mit konstanter Schütthöhe, d.h. konstantem Strohvolumen durchgeführt werden. Die über dem Massendurchsatz aufgetragene Durchsatz/Verlust-Kennlinie und damit die Schüttlerleistung müßte dann auf die Trockenmasse oder einen Referenzfeuchtwert zurückgerechnet werden. Da bei den hier beschriebenen Versuchen der Durchdringungszeitversuch mit konstanter Massenbelegung durchgeführt wurde, werden die Ergebnisse in trockenen und feuchten Weizenbeständen im folgenden getrennt betrachtet.

Bild 73 zeigt die unter vergleichbaren Bedingungen gemessene Schüttlerleistung/Durchdringungszeit-Wertepaare aus den Versuchsjahren 1989 und 1990. Die eingezeichnete Korrelation bestätigt die Annahme eines linearen Zusammenhanges. Bemerkenswert ist, daß die Meßwertpaare, die die in Bild 72 vermutete Korrelation unterstützen, offensichtlich zufällige Meßfehler darstellen. Die Breite des eingezeichneten Vertrauensbereiches entspricht der Genauigkeit der Schüttlerleistungsbestimmung aus den über dem NKB-Massendurchsatz aufgetragenen Durchsatz/Verlust-Kennlinien. Eine Änderung der gemessenen Durchdringungszeit $t_{0,8}$ um eine Sekunde bewirkt demnach eine Schüttlerleistungsänderung von 0,17 kg/s.m.

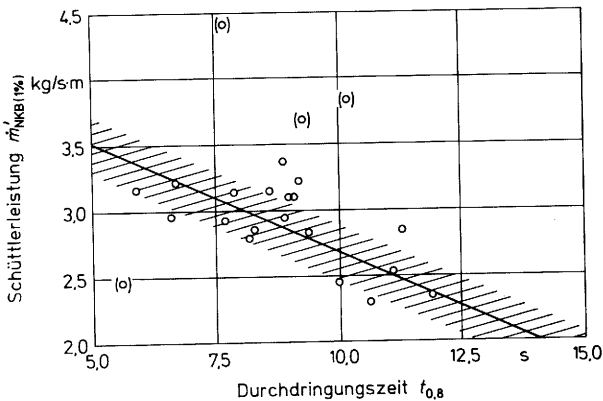


Bild 73: Durchdringungszeit/Schüttlerleistung-Meßwerte für trockene Weizenbestände der Versuchsjahre 1989 und 1990.

Bild 74 zeigt die bei vergleichbarer Strohichte in Feuchtwoizenbeständen gemessenen Wertepaare. Auch diese Ergebnisse bestätigen die Annahme einer linearen Korrelation, sind aber aus den o.g. Gründen nicht direkt vergleichbar. Eine Durchdringungszeitänderung von einer Sekunde bewirkt in diesem Falle eine Schüttlerleistungsänderung von 0,31 kg/s.m. Der durch die Dichteunterschiede hervorgerufene Faktor zwei zeigt sich damit auch bei der Korrelation.

Die in Bild 73 und in Bild 74 dargestellten Korrelationen entstanden aus Versuchen aus lediglich zwei Versuchsjahren.

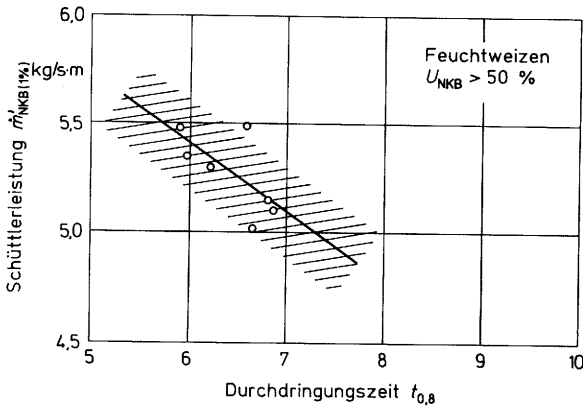


Bild 74: Durchdringungszeit/Schüttlerleistung-Meßwerte für Feuchtwoizenbestände der Versuchsjahre 1989 und 1990.

Um sie abzusichern sind weitere Versuche, vor allem auch in anderen Getreidearten, notwendig. Die Hauptschwierigkeit liegt dabei in der meßtechnisch nur relativ ungenau zu bestimmenden Schüttlerleistung. Leistungsunterschiede von $\pm 10\%$ können in der Regel nicht mit hinreichender Sicherheit nachgewiesen werden.

Hierin liegt, neben dem weit geringeren Aufwand für die Messung der Durchdringungszeit, der entscheidende Vorteil beim Ersatz des Vergleichsmähdreschers durch Meßverfahren für technologische Stoffeigenschaften. Die technologische Stoffeigenschaft Durchdringungszeit $t_{0,8}$ kann bei entsprechend großer Anzahl von Wiederholungsversuchen mit guter Genauigkeit bestimmt werden und könnte dadurch in Zukunft nicht nur die Bestimmung einer Stoffeigenchaftsreferenz mit relativ kleinem Aufwand, sondern auch eine Erhöhung der Genauigkeit dieses Referenzwertes ermöglichen, falls die bisherigen Ergebnisse in weiteren Versuchen bestätigt werden können. Ein zusätzliches Problem stellt die Abhängigkeit der Fördergeschwindigkeit w_s vom mittleren Gutfeuchtegehalt U dar (vgl. Bild 18). Durch eine veränderte Fördergeschwindigkeit wird die Korrelation mit der Durchdringungszeit gestört, da sich die Verweilzeit des Haufwerkes auf dem Schüttler ändert.

7.2 Reinigungsleistung und Fluidisierungsgeschwindigkeit

Feldversuche zur Überprüfung der Korrelation zwischen Reinigungsleistung und Fluidisierungsgeschwindigkeit des Reinigungsgemisches wurden in den Jahren 1988 bis 1990 durchgeführt. Für die Jahre 1988 und 1989 konnte nur aus einer kleinen Anzahl von Durchsatz/-Verlustkennlinien die Reinigungsleistung bestimmt werden, da die Kornverlustgrenze von 0,5%, trotz hoher Schüttlerverluste nicht überschritten wurden. Anders als bei der Korn/Stroh-Trennung, kann die Durchsatz/Verlust-Kennlinie der Reinigungsanlage entweder über dem Kornmassen- oder dem NKB-Massendurchsatz aufgetragen werden, da das Korn/NKB-Verhältnis beim Tangentialdreschwerk und ernte-feuchtem Reinigungsgut über dem Durchsatz nahezu konstant ist, Bild 75.

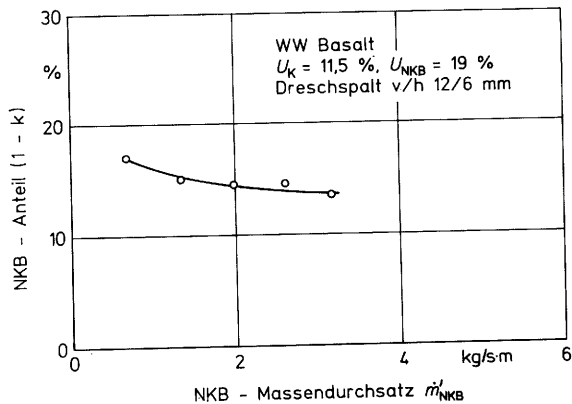


Bild 75: NKB-Anteil (1-k) des Korn/NKB-Gemisches auf der Reinigungsanlage über dem NKB-Durchsatz des Schüttlers für ein Tangentialdreschwerk nach [56].

Kornmassendurchsatz $\dot{m}'_K$ und NKB-Massendurchsatz $\dot{m}'_{NKB}$ stehen im Bereich der Leistungsgrenze der Reinigungsanlage in einem konstanten Verhältnis zueinander. Die Meßwerte für den Kornanteil am Gesamtmassendurchsatz $\dot{m}'_{ges}$ der Reinigungsanlage streuen lediglich im Rahmen einer Normalverteilung, Bild 76.

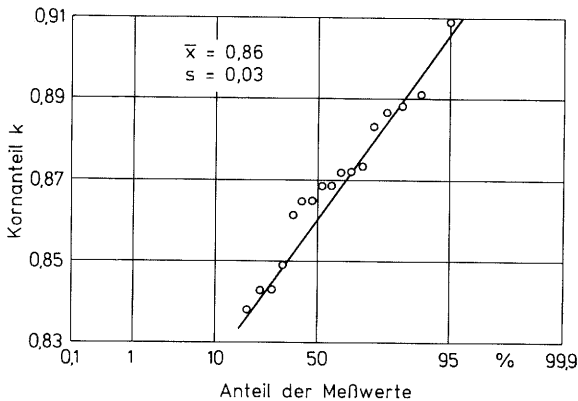


Bild 76: Kornanteil k am gesamten Massendurchsatz der Reinigungsanlage des Versuchsmähdreschers im Bereich der Leistungsgrenze der Reinigungsanlage.

In Bild 77 sind für das Versuchsjahr 1990 die für die Reinigungsanlage im Versuchsmähdrescher in verschiedenen Winterweizenbeständen gemessenen Durchsatz/Verlust-Kennlinien über dem NKB-Massendurchsatz aufgetragen.

Die Fluidisierungsgeschwindigkeiten der Korn- und der NKB-Fraktion des Reinigungsgemisches wurden während der Kennlinienaufnahme mit dem Fluidisierungs-Prüfstand im mobilen Labor ermittelt. Aus den Mittelwerten der Wiederholungsversuche für NKB und Korn wurde nach den in 4.3 beschriebenen Verfahren die Fluidisierungsgeschwindigkeit des Reinigungsgemisches errechnet. Für den Kornanteil k wurde in die Gleichung (39) der in Bild 76 eingetragene Mittelwert der Normalverteilung eingesetzt.

Korrelation

Anschließend wurde die Korrelation zwischen der Fluidisierungsgeschwindigkeit $w_{FL(RG)}$ des Reinigungsgemisches und der Reinigungsleistung $m'_{(0,5\%)}$ untersucht. In Bild 78 ist diese Korrelation für die als NKB-Massendurchsatz ausgedrückte Reinigungsleistung dargestellt.

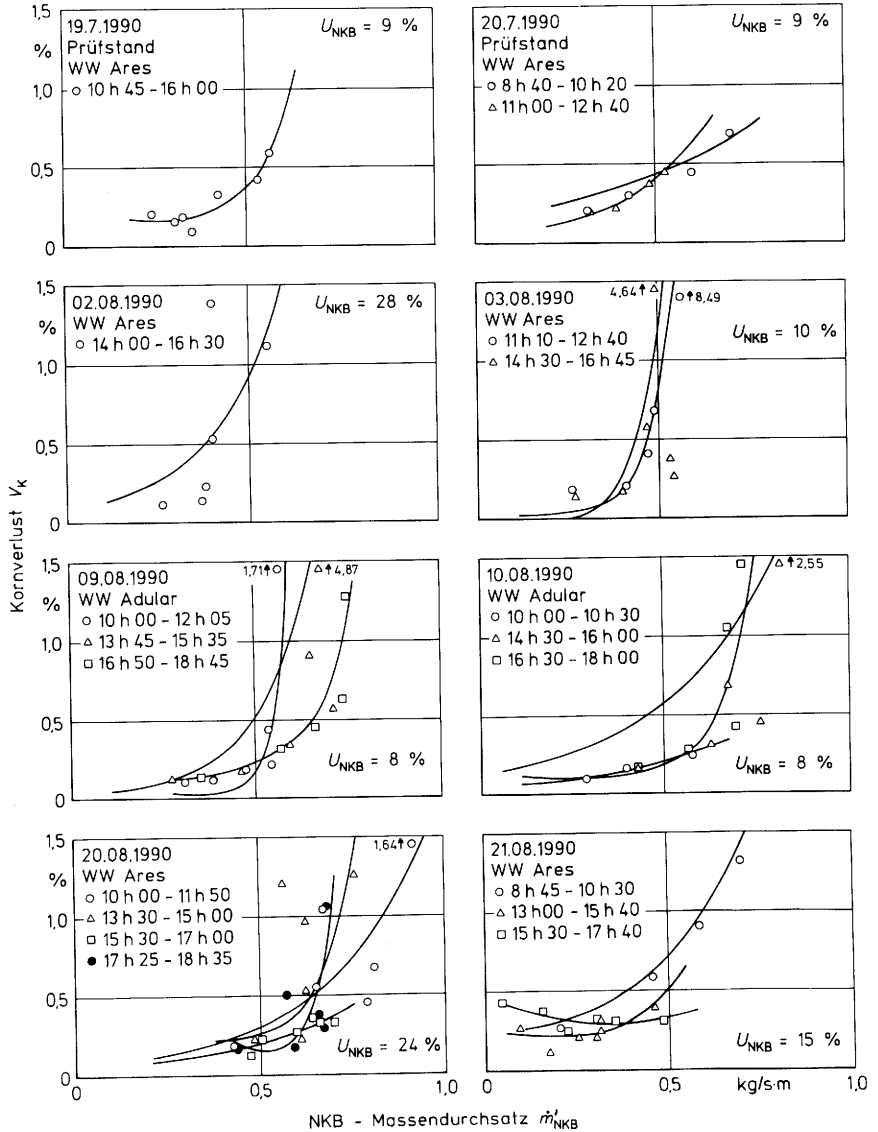


Bild 77: Durchsatz/Verlust-Kennlinien der Reinigungsanlage im Versuchsmähdrescher in verschiedenen Winterweizenbeständen für das Versuchsjahr 1990.

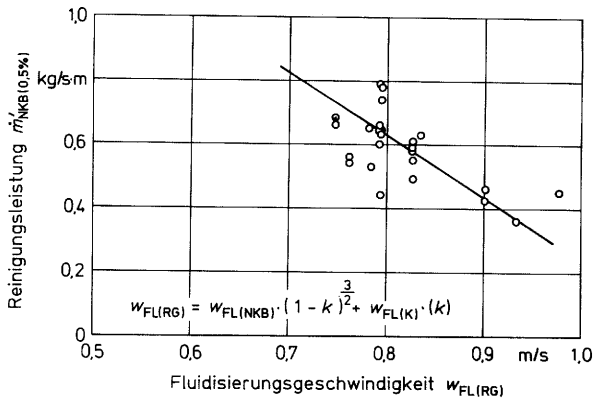


Bild 78: Zusammenhang zwischen der Fluidisierungsgeschwindigkeit des Reinigungsgemisches und der Reinigungsleistung (NKB-Massendurchsatz).

Die Versuchsergebnisse bestätigen den erwarteten Zusammenhang. Mit zunehmender Fluidisierungsgeschwindigkeit sinkt der Massendurchsatz, bei dem das Reinigungsgebläse die fluidisierte Schüttung auf dem Obersieb aufrecht erhalten kann und damit auch die Reinigungsleistung. Die Art des Zusammenhanges wird vom Verlauf der Gebläsekennlinie des Reinigungsgebläses bestimmt. Für das im Versuchsmäh-drescher eingesetzte Radialgebläse ist die Gebläsekennlinie im Arbeitsbereich eine Gerade. Der dadurch entstehende Zusammenhang zwischen Reinigungsleistung und Fluidisierungsgeschwindigkeit ist damit ebenfalls linear. Wegen der nur begrenzten Genauigkeit der Messung der Reinigungsleistung, ist mit der berechneten Korrelation nur eine qualitative Aussage möglich.

Die Fluidisierungsgeschwindigkeit kann mit den hier beschriebenen Meßverfahren sehr viel genauer als die Reinigungsleistung bestimmt werden. Wenn es gelingt, die dargestellte Korrelation in weiteren Versuchen und für andere Getreidearten zu bestätigen, kann dadurch auch die Qualität der Referenzwerte in Zukunft erheblich erhöht werden.

8 Zusammenfassung

Die technische Leistung eines Mähdreschers wird vom Verlustverhalten seiner Trennelemente bestimmt. Der bei der Korn/Stroh- und bei der Korn/Spreu-Trennung auftretende Kornverlust ist eine Funktion des Durchsatzes. Der Zusammenhang kann graphisch als Durchsatz/-Verlust-Kennlinie dargestellt werden. Der Schnittpunkt der Kennlinie mit einem zulässigen Verlustniveau legt auf der Abszisse einen Durchsatz fest, der als Trennprozeßleistung definiert wird.

Parameter der Durchsatz/Verlust-Kennlinie sind die Konstruktion und die Einstellung der Trennelemente sowie die Stoffeigenschaften des Erntegutes und die Erntebedingungen. Vor allem der Einfluß der Stoffeigenschaften führt dazu, daß für die Trennprozesse desselben Mähdreschers verschiedene Leistungen gemessen werden, wenn die Maschine in verschiedenen Jahren oder Beständen eingesetzt wird. Der Vergleich der Leistungen verschiedener Maschinen wird dadurch erheblich erschwert. Um gemessene Leistungen überhaupt quantitativ vergleichen zu können, muß deshalb ein Vergleichsmähdrescher während der Leistungsmessung eines Prüfmähdreschers eingesetzt werden. Die gemessene Leistung des Vergleichsmähdreschers wird als Referenzwert verwendet, auf den die Leistung des Prüfmähdreschers bezogen wird. Die Leistungen verschiedener Prüfmähdrescher werden damit vergleichbar, wenn die Leistung desselben Vergleichsmähdreschers jeweils parallel und gleichzeitig mitgemessen wurde. Wegen des großen Versuchsaufwandes für die Messung einer Durchsatz/Verlust-Kennlinie können Vergleichsmähdrescher nur selten eingesetzt werden, so daß in der Regel weder bei Maschinenprüfungen noch bei Leistungstests während der Entwicklung quantitativ vergleichbare Leistungswerte ermittelt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden deshalb Stoffeigenschaften des Erntegutes mit geeigneten Meßverfahren direkt gemessen und die Korrelation von Stoffeigenschaftsänderungen mit Leistungsänderungen der Trennprozesse eines Versuchsmähdreschers untersucht. Damit werden die Grundlagen für die Ermittlung von Stoffeigenschafts-Referenzwerten während der Leistungsmessung von Mähdreschern geschaffen. Diese Referenzwerte können nicht nur mit wesentlich geringerem Aufwand als die Referenzleistung ermittelt werden,

sondern erlauben auch eine Verbesserung der Genauigkeit der Referenz.

Zunächst wird der Begriff Stoffeigenschaft im Hinblick auf seine Verwendung in der Landtechnik und in der mechanischen Verfahrenstechnik erläutert. Aus der Betrachtung der für die Beurteilung der Trennprozesse im Mähdrescher maßgeblichen Stoffeigenschaften wird eine Einteilung der Stoffeigenschaften nach ihrer Komplexität in die Gruppen

- einfache physikalische Stoffeigenschaften
- komplexe physikalische Stoffeigenschaften
- technologische Stoffeigenschaften

vorgenommen und begründet. Anschließend werden die Ergebnisse der bisher zum Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher durchgeführten Arbeiten zusammengestellt. Dabei zeigt sich, daß relativ leicht zu messende einfache physikalische Stoffeigenschaften wie z.B. Reibungszahlen, Elastizität und Gutfeuchte zwar die eigentliche Ursache für Leistungsänderungen sind, wegen der komplexen Abhängigkeiten im Haufwerk aber keine direkte Korrelation aufweisen. Daraus wird die Notwendigkeit, wesentlich komplexere Stoffeigenschaften zu messen abgeleitet. Der Grundgedanke dabei ist, durch die Verwendung trennprozeßnaher Meßverfahren für Stoffeigenschaften, die Berücksichtigung der komplexen Abhängigkeiten von der Auswertung zur Messung zu verlagern. Aus einer Aufwand- und Nutzen-Betrachtung ergibt sich, daß die Messung von technologischen Stoffeigenschaften die besten Aussichten auf ein Optimum zwischen Aufwand und Aussagesicherheit hat. Im folgenden werden je ein Meßverfahren für eine technologische Stoffeigenschaft zur Beurteilung von Leistungsänderungen bei der Korn/Stroh- und bei der Korn/Spreu-Trennung hergeleitet.

Die Korn/Stroh-Trennung auf dem Hordenschüttler kann durch die Kornabscheide- bzw. die Korndurchgangsfunktion vollständig beschrieben werden. Veränderungen der Stoffeigenschaften führen zu einer Veränderung des Verlaufs der Korndurchgangsfunktion. Ein Meßverfahren für eine technologische Stoffeigenschaft zur Beurteilung von Schüttlerleistungsänderungen wird deshalb aus der Messung der Korndurchgangsfunktion mit einem standardisierten Entmischungsversuch abgeleitet. Für die mathematische Beschreibung

der Korndurchgangsfunktion werden zwei Gleichungen vorgeschlagen. In beiden Fällen handelt es sich um mehrparametrische Exponentialfunktionen, so daß als Maß für die Stoffeigenschaft Durchdringungszeit ein Kennwert verwendet wird, der die Zeitkoordinate des Schnittpunktes der Korndurchgangsfunktion mit einer sinnvoll gewählten Korndurchgangshorizontalen darstellt.

Die Betrachtung der Korn/Spren-Trennung auf dem luftdurchströmten Flachsieb der Reinigungsanlage im Mähdrescher führt auf das Phänomen der Fluidisierung einer Feststoffschüttung. Nur im fluidisierten Schüttungszustand kann eine hinreichende Entmischung des Korn/Spren-Gemisches auf der Reinigungsanlage stattfinden. Der fluidisierte Zustand wird erst ab einer bestimmten Luftgeschwindigkeit beim Durchströmen der Schüttung erreicht. Die Fluidisierungsgeschwindigkeit, bei der die Fluidisierung einsetzt, ist eine Stoffeigenschaft des Reinigungsgemisches. Der Betriebspunkt des Reinigungsgebläses hängt über die Gebläsekennlinie direkt vom Masseudurchsatz der Reinigungsanlage ab, da dieser proportional dem durch die Schüttung erzeugten Druckabfall ist. Von der Fluidisierungsgeschwindigkeit des Reinigungsgemisches hängt es ab, ob der sich einstellende Volumenstrom zur Fluidisierung des Gemisches ausreicht oder ob die Leistungsgrenze (Grenzmassendurchsatz) der Reinigungsanlage bereits erreicht ist. Es besteht damit eine Korrelation zwischen der Fluidisierungsgeschwindigkeit und der Reinigungsleistung.

Im experimentellen Teil der Arbeit werden die für die Messung der Durchdringungszeit und der Fluidisierungsgeschwindigkeit verwendeten Meßverfahren erläutert und die für die Wahl der Parameter der Normversuche verwendeten optimalen Parameter experimentell bestimmt. Aus umfangreichen Versuchen werden mit statistischen Methoden die Genauigkeiten und die typischen Meßfehler der Meßverfahren ermittelt sowie die Eignung der Meßverfahren zur Messung von technologischen Stoffeigenschaften nachgewiesen.

Für die experimentelle Überprüfung der theoretisch hergeleiteten Korrelationen werden Feldversuche mit den in einem mobilen Labor eingesetzten Meßverfahren und mit einem Versuchsmähdrescher durchgeführt. Die für die Messung der Durchsatz/Verlust-Kennlinien verwendete Feldversuchstechnik wird erläutert und die Grundlagen

für die Berechnung von stetigen Durchsatz/Verlust-Kennlinien aus einzelnen Meßpunkten werden zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Feldversuche werden in Fluidisierungsgeschwindigkeit/Reinigungsleistung- und Durchdringungszeit/Schüttlerleistung-Diagrammen dargestellt. Die theoretisch hergeleiteten Korrelationen werden für beide Meßverfahren und Trennprozesse experimentell bestätigt. Die statistische Qualität der Korrelationen ist beschränkt, da sowohl die Schüttler- als auch die Reinigungsleistung des Versuchsmähdreschers prinzipbedingt nur relativ ungenau gemessen werden können. Für signifikante Veränderungen der Stoffeigenschaften können aber bereits aus den lediglich aus zwei Versuchsjahren stammenden Daten der experimentellen Korrelation Referenzwerte abgeleitet werden.

9 Schrifttum

- [1] Kutzbach, Heinz Dieter: Lehrbuch der Agrartechnik. Bd.1 Allgemeine Grundlagen-Ackerschlepper-Fördertechnik. Hamburg: Parey 1989, S.97/106.
- [2] Gerhartz, Wolfgang [Hrsg.]: Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry. Bd.B Basic knowledge. 2. Unit operations. New York: VCH 1988. S.1-1/1-7
- [3] Kutzbach, Heinz Dieter: Mähdrescher. in: Jahrbuch Agrartechnik Bd.1. Hrsg. Hans Jürgen Matthies und Friedhelm Meier. Frankfurt: Maschinenbau-Verlag 1988, S.91/95.
- [4] Kutzbach, Heinz Dieter: Dresch- und Trennsysteme neuer Mähdrescher. Landtechnik Bd.38 (1983) Nr.6, S.226/230.
- [5] Wacker, Peter: Mähdrescherbauarten. in: Mähdruschernte von Sonderfrüchten. KTBL-Arbeitspapier 139. Darmstadt: KTBL 1990. S.23/58.
- [6] Busse, Winfried: Separationssysteme-Erntekosten. in: VDI/MEG Kolloquium Landtechnik Bd.6 Mähdrescher. Düsseldorf: VDI-Fachgruppe Landtechnik 1988, S.15/30.
- [7] Beck, Thomas u. Kutzbach, Heinz Dieter: Messung und Beurteilung der Leistung von Mähdreschern. Landtechnik Bd.45 (1990) Nr.6, S.218/222.
- [8] Prairie Agricultural Machinery Institute (PAMI): John Deere 9500 Self-Propelled Combine. Evaluation Report 631. Humboldt/Kanada: 1990.
- [9] Wrubleski, P.D. u. Nyborg, N.O.: Prairie Agricultural Machinery Institute field evaluation of combines. Proc. International Conference on grain and forage harvesting, Ames/Iowa, 25.-29. Sept. 1977, S.118/123.
- [10] Spiess, Ernst: Mähdrescher im Test - Folgerungen für die Praxis. Landtechnik Bd. 41 (1986) Nr.6, S.268/272.
- [11] Ullrich, Hansjürgen: Mechanische Verfahrenstechnik. Berlin: Springer 1967, S.30/65.
- [12] Muschelknautz, Edgar: Grundlagen der mechanischen Verfahrenstechnik. Stuttgart, Universität, Vorlesungsmanuskript: Institut für mechanische Verfahrenstechnik 1984, S. 10/21.
- [13] Beck, Thomas: Performance changes of the cleaning unit of a combine harvester during field tests. in: Agricultural Engineering Bd.3: Agricultural Mechanization. Hrsg. Dodd, Vincent und Grace, Patrick. Rotterdam: Balkema 1989, S.1851/1855.
- [14] Hofacker, Werner: Trocknungsverhalten und Qualitätsänderungen von Weizen. Stuttgart, Universität, Fakultät 13 Diss., 1986 (MEG Forsch.ber. 128).

- [15] Kustermann, Martin: Beanspruchung realer Körper durch Stoß dargestellt am Beispiel des Schlages gegen ein Maiskorn. Stuttgart, Universität, Fakultät 5 Diss., 1986 (MEG Forsch.-ber. 123).
- [16] Mohsenin, Nuri: Physical properties of plant and animal materials. Bd.1 : Structure, physical characteristics and mechanical properties. New York: Gordon & Breach 1970.
- [17] Rumpf, Hans: Mechanische Verfahrenstechnik. München: Hanser 1975.
- [18] Hall, J.W. u. Husman, J.F.: Correlating physical properties with combine performance. ASAE Paper No. 81-3538. St.Joseph/-Michigan: American Society of Agricultural Engineers 1981.
- [19] Hertwig, Andreas: Konstruktion und Erprobung eines Prüfstandes zur Ermittlung des Scherverhaltens von Stroh. Stuttgart, Universität, Lehrgebiet Landmaschinen, Dipl.Arb. (unveröffentlicht) 1989.
- [20] Sietz, W.: Brabender Extensograph. Ein nützliches und notwendiges Gerät zur Messung der Weizenqualität in der Mühlen und Backwaren-Industrie. Duisburg: Brabender OHG 1991. Lit.verz.Nr. 91/2. (Firmenschrift).
- [21] Beck, Thomas: Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Korn-Stroh- und Korn-Spreu-Trennung von Mähdreschern. in: VDI/MEG Kolloquium Landtechnik Bd.6 Mähdrescher. Düsseldorf: VDI-Fachgruppe Landtechnik 1988, S.107/119.
- [22] Beitz, W. u. Küttner, K.-H. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 14.Aufl. Berlin: Springer, 1981, S.279.
- [23] Balassa, Friedrich u. Nachtweh, Alwin: Die Dreschmaschinen, ihre Bauart und ihr praktischer Betrieb. München: Oldenbourg 1912, S.3.
- [24] Gorsler, A. u. Zunke : Einzelprüfung der Verbunddreschmaschine Köla V20. Maschinen- und Geräteprüfungen des Reichtumsnährstandes. in: Technik in der Landwirtschaft Bd.21 (1940) S.20/22.
- [25] Hoffmann u. Mohs: Das mechanische Verhalten des Getreides bei der Lagerung. in: Das Getreidekorn. Bd.1. Berlin: Parey 1931, S.86/90.
- [26] Heyland, Klaus-Ulrich: Qualitätsuntersuchungen am Stroh von deutschen Weizensorten. Acker- und Pflanzenbau Bd.97 (1953) Nr.2, S.129/154.
- [27] Kutzbach, Heinz Dieter u. Scherer, Reinhold: Das Reibverhalten von Körnerfrüchten - Eine Schrifttumsübersicht. Grndl. Landtechnik Bd.27 (1977) H.6, S.213/219.
- [28] Kutzbach, Heinz Dieter u. Scherer, Reinhold: Mechanische Eigenschaften von Körnerfrüchten. Grndl. Landtechnik Bd.28 (1978) Nr.1, S.6/12.

- [29] Lüdtkke, Herwart: Die Arbeit des ersten deutschen Mähdreschers in der Ernte 1932. Technik i.d. Landwirtschaft Bd.13 (1932) Nr.7, S.70/72.
- [30] Buchele, Wesley F. u. Quick, Graeme R.: The Grain Harvesters. St. Joseph/Michigan: ASAE 1978.
- [31] Persson, Sverker: Eigenschaften des Reinigungsgutes in Mähdreschern. Landt. Forsch. Bd.7 (1957) Nr.5, S.41/45.
- [32] Segler, Georg u. Wieneke, Franz: Dreschverluste und Leistungsbedarf des Mähdreschers beim Verarbeiten von Getreide mit Grüngutbesatz. Landt. Forsch. Bd.11 (1961) Nr.5, S.141/144.
- [33] Wiljes, H.G.: Kornfeuchte-Verhalten bei Mähdruschfrüchten. Landtechnik Bd.28 (1973) Nr.13, S.352.
- [34] Hofmann, G.; Meißner, G. u. Müller, Anke: Methodik zur experimentellen Prozeßanalyse unter Feldbedingungen am Beispiel Mähdrusch. agrartechnik Bd. 35 (1985) Nr. 4, S. 154/156.
- [35] Bayn, H. u. Peters, A.: Rationalisierung der Testung von Mähdreschern. agrartechnik Bd. 37 (1987) Nr. 2, S.89/90.
- [36] Naessens, Paul. R.: Combine Testing in Europe. Proc. International Conference on Grain and Forage Harvesting, Ames/Iowa, 25.-29. Sept. 1977, S. 116/123.
- [37] Huynh, V.M.; Powell, T. u. Siddal, J.N.: Threshing and Separating Process-A Mathematical Model. Trans. ASAE Bd.25 (1982) Nr.1, S. 65/73.
- [38] Nath, Surya; Johnson, W.H. u. Milliken, G.A.: Combine Loss Model and Optimization of the Machine System. Trans. ASAE Bd.25 (1982) Nr.2, S. 308/312.
- [39] Caspers, Ludwig: Neue alternative Dreschsysteme mit besonderer Beschreibung des Mehrtrommel-Abscheidesystems und seiner Leistungscharakteristik. Grundl. Landtechnik Bd.37 (1987) Nr.4, S. 117/120.
- [40] Spittel, A.: Zum Einfluß ausgewählter Stoffparameter auf das Arbeitsergebnis der Reinigungseinrichtung eines Mähdreschers. agrartechnik Bd.29 (1979) Nr. 4, S. 154/156.
- [41] Huisman, Willem: Moisture content, coefficient of friction and modulus of elasticity of straw in relation to walker losses in a combine harvester. Proc. International Conference on Grain and Forage Harvesting, Ames/Iowa, 25.-29. Sept. 1977, S.118/123.
- [42] Stephens, Lyle E. u. Rabe, David L.: Crop Properties Data for Harvesting Research. Proc. International Conference on Grain and Forage Harvesting, Ames/Iowa, 25.-29. Sept. 1977, S.32/33.

- [43] West, Neil L.: Development of Crop Index Parameters. Moline/-Illinois: John Deere Harvester Works, Technical Report, 6. April 1976 (unveröffentlicht).
- [44] Rabe, David L.: Crop Harvesting Index for combinable Crops. Moline/Illinois: John Deere Harvester Works, Technical Report, 9. April 1976 (unveröffentlicht).
- [45] Rabe, David L.: Chaff Characterization Study. Moline/-Illinois: John Deere Harvester Works, Technical Report, 17. Nov. 1976 (unveröffentlicht).
- [46] Brasmer, S.E.: Crop Properties Symposium. Moline/Illinois: John Deere Harvester Works, Technical Report, 13. Feb. 1981 (unveröffentlicht).
- [47] Srivastava, Ajit K., Mahoney, Wilbur T. u. West, Neil L.: Effect of Crop Properties on Combine Performance. ASAE Paper No. 86-1583. St. Joseph/Michigan: American Society of Agricultural Engineers 1986.
- [48] Srivastava, Ajit K., Mahoney, Wilbur T. u. West, Neil L.: The Effect of Crop Properties on Combine Performance. Trans. ASAE Bd.33 (1990) Nr. 1 S.63/72.
- [49] Mahoney, Wilbur T. u. Srivastava, Ajit K.: Property based Combine Simulation Model. ASAE Paper No. 86-1578. St. Joseph-/Michigan: American Society of Agricultural Engineers 1986.
- [50] Mahoney, Wilbur T.: The Simulation of Combine Harvester Performance as affected by Bulk Crop Properties. East Lansing/-Michigan, State University, Diss., 1988. (diese Arbeit war bei Abfassung des Manuskriptes noch nicht zugänglich).
- [51] Sonnenberg, Hans: Korn-Stroh-Trennung mit Doppelkurbel-Hordenschüttlern. Grundl. Landtechnik Bd.20 (1970) Nr.6, S.161/-166.
- [52] Beisteiner, Franz: Grundlagen der Fördertechnik. Stuttgart, Universität, Vorlesungsmanuskript: Institut für Fördertechnik, Getriebetechnik und Baumaschinen, 1984.
- [53] Rochell, Peter: Untersuchungen über den Fördervorgang auf dem Schwingförderer unter besonderer Berücksichtigung der Reinigungsanlage im Mähdrescher. Stuttgart, Universität, Diss., 1975 (MEG Forsch.ber. 4).
- [54] Baader, Wolfgang, Sonnenberg, Hans und Peters, Heinrich: Die Entmischung eines Korngut-Fasergut-Haufwerkes auf einer vertikal schwingenden, horizontalen Unterlage. Grundl. Landtechnik Bd.19 (1969) Nr.5, S.149/157.
- [55] Kanafojski, Czeslaw: Halmfruchterntemaschinen. Berlin: VEB Technik 1974, S.192/206.
- [56] Wacker, Peter: Laboruntersuchungen an konventionellen Mähdreschern mit Tangentialdreschwerk und Hordenschüttler. Hohenheim, Universität, Versuchsberichte: Institut für Agrartechnik (unveröffentlicht) 1988.

- [57] Böttinger, Stefan: Entwicklung von Meß- und Regeleinrichtungen zur Optimierung der Trennprozesse im Mähdreschern zur Steigerung des Durchsatzes und zur Verminderung des Bedienungsaufwandes. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben DFG Ku 480/3. Hohenheim, Universität: Institut für Agrartechnik 1991 (unveröffentlicht).
- [58] Glaser, Fritz: Korn-Stroh-Trennung unter besonderer Berücksichtigung eines umlaufenden Siebbandschüttlers (Zinkenbandschüttler). München, Universität, Diss., 1976 (MEG Forsch.-ber. 13).
- [59] Böttinger, Stefan: The Separation Function of Walkers and Cleaning Unit- Its Use for maximizing the Efficiency of Combine Harvesters. Postershow P 11.10. Intern. Conference on Agricultural Engineering. Berlin: 1990.
- [60] Meier, H.: Strohschüttler in Mähdreschern. Gottmadingen, Maschinenfabrik Fahr AG, Versuchsbericht Nr.66/1 1966 (unveröffentlicht).
- [61] Freye, Theo: Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage im Mähdrescher. Hohenheim, Universität, Diss., 1980 (MEG Forsch.ber. 47).
- [62] Leva, Max: Fluidization. New York: McGraw-Hill 1959.
- [63] Reh, Lothar: Wirbelschicht in nichtkatalytischen Reaktionen. in: Ullmanns Encyclopädie der Technischen Chemie, Bd.3. Weinheim/Bergstraße: Verlag Chemie 1973. 4.Auflage, S.433 ff.
- [64] Keuneke, Klaus: Fluidisierung und Fließbettförderung von Schüttgütern kleiner Teilchengröße. VDI-Forschungsheft 509. Düsseldorf: VDI-Verlag 1965.
- [65] Zabeltitz von, Christian: Über die Trennung von Körpern verschiedener Dichte in einem Fließbett. Fortschritt-Bericht VDI Reihe 14 Nr.3. Düsseldorf: VDI-Verlag 1966.
- [66] Ergun, Sabri und Orning, A.A.: Fluid flow through randomly packed columns and fluidized beds. Industrial and Engineering Chemistry Bd.41 (1949) Nr.6, S. 1179/1184.
- [67] Ergun, Sabri: Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress Bd.48 (1952) Nr.2, S.89/94.
- [68] Werther, Joachim: Strömungsmechanische Grundlagen der Wirbelschichttechnik. Chemie-Ingenieur-Technik Bd. 49 (1977) Nr.3, S.193/202.
- [69] Werther, Joachim: Grundlagen der Wirbelschichttechnik. Chemie-Ingenieur-Technik Bd. 54 (1982) Nr. 10, S.876/883.
- [70] Werther, Joachim: Zur Maßstabsvergrößerung von Gas/Feststoff-Wirbelschichten. Aufbereitungstechnik Bd.15 (1974) Nr.12, S.670/677.

- [71] Wessel, Josef: Grundlagen des Siebens und Sichtens. Teil 2: Das Siebklassieren. Aufbereitungstechnik Bd.8 (1967) Nr.4, S.167/180.
- [72] Grobler, Werner H.: Untersuchungen zur Korn-Stroh-Trennung mit überlagerten Beschleunigungen im Planetentrommelsortierer. Stuttgart, Universität, Fakultät 5 Diss., 1987 (MEG Forsch.ber. 140).
- [73] Gonzáles Oliva, Abel: Einfluß verschiedener Parameter auf die Trenneigenschaften des Planetentrommelsortierers bei der Korn-Spreu-Trennung. Hohenheim, Universität, Diss. 1989 (MEG Forsch.ber. 160).
- [74] Damm, Joachim: Der Sortiervorgang beim luftdurchströmten Schwingsieb. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 3 Nr.37. Düsseldorf: VDI-Verlag 1972.
- [75] Freye, Theo und Segler, Georg: Vibro-pneumatische Trennung von Korn, Stroh und Spreu im Mähdrescher. Grundl. Landtechnik Bd.27 (1977) Nr. 4, S.101/108.
- [76] Kutzbach, Heinz Dieter: Verringerung der Körnerverluste beim Mähdrescher im Hangeinsatz. Landtechnik Bd.40 (1985) Nr. 6, S.278/280.
- [77] Kutzbach, Heinz Dieter: Mähdrescher. in: Jahrbuch Agrartechnik Bd.2. Hrsg. Hans Jürgen Matthies und Friedhelm Meier. Frankfurt: Maschinenbau-Verlag 1989, S.75/78.
- [78] Böttinger, Stefan: Durchsatzbestimmung für eine Regelung der Mähdrescher-Reinigungsanlage. in: Agricultural Engineering Bd.3: Agricultural Mechanization. Hrsg. Dodd, Vincent und Grace, Patrick. Rotterdam: Balkema 1989, S.1857/1862.
- [79] Kreyszig, Erwin: Statistische Methoden und ihre Anwendung. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht 7.Auflage 1988.
- [80] Hewlett Packard: HP 9882A. Statistical Library for the HP 9000 Series 200/300 Computers. Fort Collins/Colorado 1986.
- [81] Norm DIN 1952 Juli 1982. Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren in voll durchströmten Rohren mit Kreisquerschnitt. Berlin: Beuth 1982.
- [82] Wacker, Peter: Untersuchungen zum Dresch- und Trennvorgang von Getreide in einem Axialdreschwerk. Hohenheim, Universität, Diss., 1985 (MEG Forsch.ber. 117).
- [83] Hall, J.W.: Using statistics to improve combine testing. Moline/Illinois: John Deere Harvester Works, Technical Report, 1981 (unveröffentlicht).
- [84] Normentwurf DIN 11 390 Mai 1989. Landmaschinen. Prüfverfahren für Mähdrescher. Berlin: Beuth 1989.
Draft International Standard ISO/DIS 8210 November 1985.
Equipment for harvesting. Combine harvesters. Testing procedure.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Martin Büermann
Geburtstag:	26. Januar 1965 in Göttingen
Familienstand:	ledig

Schulbildung

1971 - 1975	Grundschule in Gö-Herberhausen
1975 - 1984	Theodor-Heuss-Gymnasium in Göttingen
	Abschluß: Allgemeine Hochschulreife

Studium

10/84 - 03/87	Technische Universität Braunschweig
	Studium des Maschinenbaus
	Vordiplom abgelegt im April 1987

Ausbildung

09/86 - 06/88	Germanial Maschinenfabrik Leo Lautenbach
	3429 Germershausen
	Ausbildung zum Landmaschinenmechaniker

Studium

10/88 - 4/91	Technische Universität Braunschweig
	Hauptstudium Maschinenbau in der Fachrichtung
	Schlepper-, Erdbau- und Landmaschinen
	Abschluß als Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Berufstätigkeit

5/91 - 12/95	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Grundlagen der Landtechnik im Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim
seit 1/96	Entwicklungingenieur bei der Firma Deutz-Fahr-Erntesysteme GmbH, Lauingen im Bereich der Mähdrescherentwicklung

Bereits veröffentlicht wurden in der Reihe 14 „Landtechnik/Lebensmitteltechnik“ u.a.

		DM
Nr. 75	H. ESDERS: Elektrohydraulisches Load Sensing für mobile Anwendungen. 1996. ISBN 3-18-307514-8	83,00
Nr. 74	K. MARTENSEN: Untersuchungen zum Thema hochverdichteter Halmgutpresslinge. 1996. ISBN 3-18-307414-1	76,00
Nr. 73	C. KAPLICK: Verifikation und Bewertung fahrdynamischer Traktor-Simulationsmodelle. 1995. ISBN 3-18-307314-5	114,00
Nr. 72	W. RAUEN de SOUZA: Ein Beitrag zur kinematischen und dynamischen Analyse von Frontmähwerksaufhängungen. 1995. ISBN 3-18-307214-9	98,00
Nr. 71	H. WESCHE: Untersuchungen zur Optimierung des Compactrollenverfahrens. 1995. ISBN 3-18-307114-2	105,00
Nr. 70	H. PFAB: Grundlagen zur Auslegung des geregelten Krafthebers bei Traktoren. 1995. ISBN 3-18-307014-6	127,00
Nr. 69	J. PLOCK: Zum Einfluß von Lactose auf die Denaturierung von Molkenproteinen in Molkenkonzentrat und auf die Ausbildung thermisch induzierter Gelstrukturen. 1994. ISBN 3-18-306914-8	108,00
Nr. 68	N. TARASINSKI: Elektronisch geregelte Dieseleinspritzung für Traktoren. 1994. ISBN 3-18-306814-1	91,00
Nr. 67	T. SIEFKES: Die Dynamik in der Kontaktfläche von Reifen und Fahrbahn und ihr Einfluß auf das Verschleißverhalten von Traktor-Triebradreifen. 1994. ISBN 3-18-306714-5	102,00
Nr. 66	S. BÖTTINGER: Die Abscheidefunktion von Hordenschüttler und Reinigungsanlage in Mähdreschern. 1993. ISBN 3-18-146614-X	74,00
Nr. 65	P. PICKEL: Simulation fahrdynamischer Eigenschaften von Traktoren. 1993. ISBN 3-18-146514-3	102,00
Nr. 64	J. MÖLLER: Untersuchungen zur Entwicklung und Optimierung einer elektrohydraulischen Traktorlenkung. 1993. ISBN 3-18-146414-7	87,00
Nr. 63	K. GOTTSCHALK: Mikrorechnersysteme zur Fehlerdiagnose an mobilen Landmaschinen. 1993. ISBN 3-18-146314-0	92,00

ISBN 3-18-3**07814**-7

- [85] Marquardt, Donald W.: An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. J. Soc. Indust. Appl. Math. Bd.11 (1963) Nr.2, S.431/441.
- [86] Bates, D.M. u. Watts, D.G.: Nonlinear Regression Analysis and its Applications. New York: Wiley & Sons 1988.
- [87] Beck, Thomas: Beurteilung der Leistung der Trennprozesse im Mähdrescher mit Hilfe gemessener Stoffeigenschaften. Grndl. Landtechnik Bd. 40 (1990) Nr.2, S.41/49.